

Submarine pressure hull design and the application of gained experience to the design of other pressure structures

Ivo Senjanović, Nikola Vladimir

*University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, ivo.senjanovic@fsb.hr*

1. Introduction

The idea of how to use a submarine as a war vessel was realised at the beginning of the 20th century when the necessary prerogatives were ensured, i.e. the development of metallurgy, the electric accumulator, the diesel engine and the torpedo. France was the first country to include a submarine in its navy in 1893, and then Italy in 1896, the USA in 1900, the UK in 1901, and after that Russia, Sweden, Germany and Japan in 1904. The Austro-Hungarian Monarchy joined these countries in 1904. At the beginning, submarines were built in Budapest, and then in Rijeka and Pula. A detailed review of submarine development in the world is given in [1].

The Croatian shipbuilding industry has continued a hundred-year tradition of submarine building, starting from the needs of the Austro-Hungarian Monarchy, then Italy and Germany up to ex-Yugoslavia [2]. The first torpedo in the world was produced in Rijeka based on the idea of Ivan Vukić which incorporated a propulsion engine and compressor. In such a way, Croatia significantly contributed to ensuring the necessary prerogatives for submarine development in the world. A new impulse for submarine improvement came with the invention of the snorkel, a battery with increased capacity, missile weapons and nowadays nuclear propulsion.

In the Ship Research Institute in Zagreb, a strong group for the research and development of submarine design was founded at the end of 1967. In Brodoprojekt in Rijeka, a department for working out technical documentation was established and in the Brodosplit shipyard in Split a new production workshop for special marine units was built. As a result of considerable investment in research and development, new knowledge was gained and scientists and experts were educated. The development of submarine pressure hull design, hydroacoustics, automatisisation, production technology and the sustaining of living conditions are all worth mentioning here.

The intention of this short overview is to point out the scientific achievements in submarine pressure hull design in the Ship Research Institute and to acknowledge the national experts who deserve credit for them [3].

2. Croatian experience

Submarine pressure hull construction is one of the most significant parts of the whole autonomous submarine system design. Extensive development of this task at a scientific level began in the Ship Research Institute in 1967. Numerical matrix methods (as a basis for the later development of the nowadays generally accepted finite element technique) were developed for the strength analysis of submarine substructures: joints of reinforced conical shells by rings, Fig. 1; pressure hull ends consisting of a reinforced conical shell and spherical dome with a torispherical transition segment, Fig. 2. These matrix methods were based on the Russian school of shell theory (Vlasov, Goldenweiser, Novozhilov [4] etc.). Necessary

computer programs for strength analysis were developed. One of the first digital computers installed in the Ruđer Bošković Institute in Zagreb was used for this purpose.

At that time, military cooperation between ex-Yugoslavia and the USSR was reinstated. Russian military experts transferred their experience of submarine pressure hull design to Croatian engineers. The following subjects were considered: methods for pressure hull strength analysis, shell stability, design load and safety factors, principles of the rational design of structural segments like external plating and ring reinforcement, hull domes, transverse bulkheads, cupola, and the strength of structural details as a reinforcement of passages and openings in the pressure hull. The strength and stability of hull segments were checked in a special pressure tank, Fig. 3.

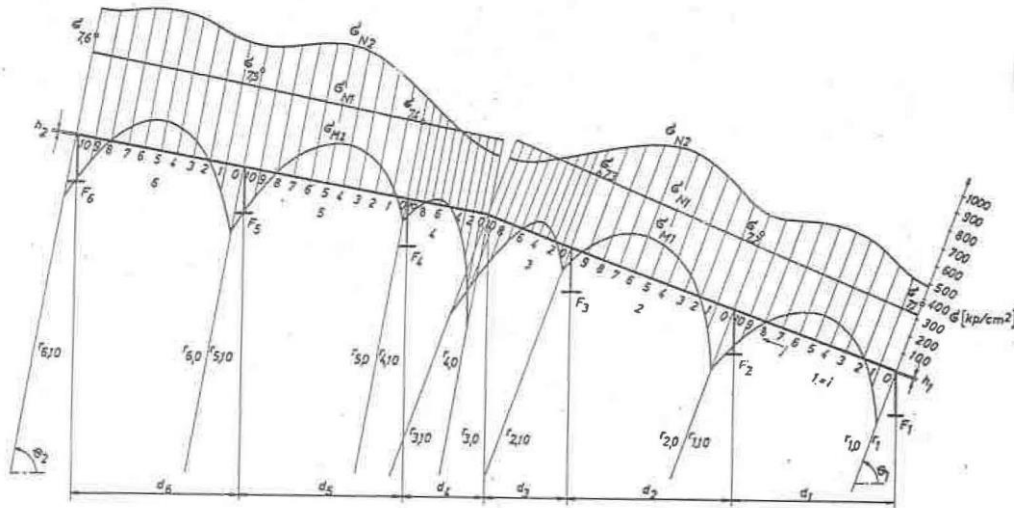


Figure 1. Distribution of stress components in the conical part of a submarine pressure hull

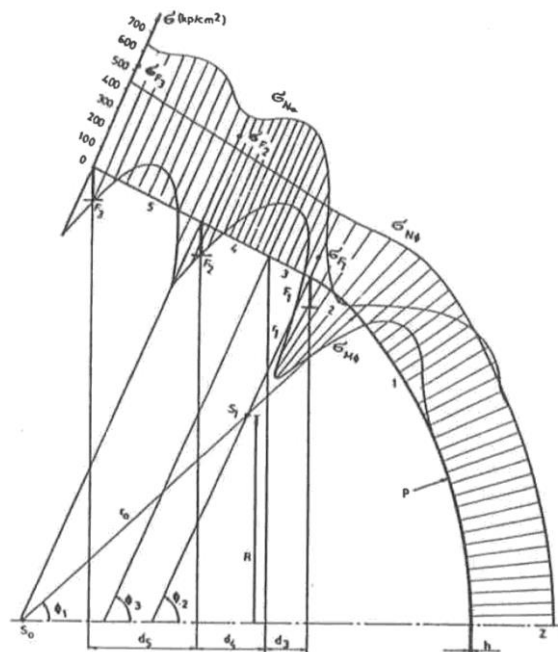


Figure 2. Distribution of stress components in the front dome of a submarine pressure hull

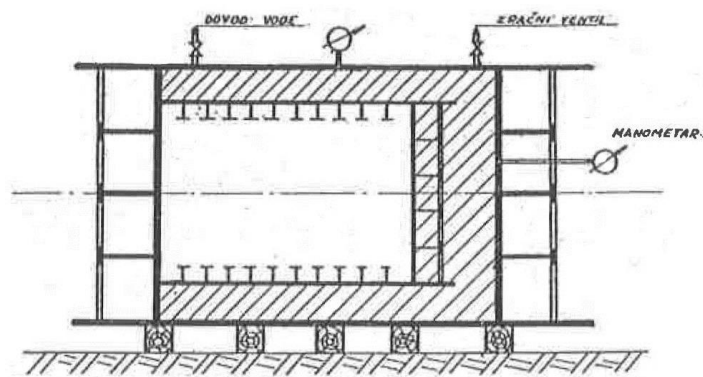


Figure 3. Pressure tank for testing submarine pressure hull sections

During the Cold War, economic sanctions were introduced for exports of electronic computers to the USSR. Hence, Russian scientists developed simplified analytical solutions for complex shell structure problems. Our numerical solutions for complicated pressure hull strength by means of computers, and the possibilities of computers in general, were a pleasant surprise for the Russian experts.

New achievements in the field of submarine pressure hull strength analysis and design were presented in two doctoral theses [5] and [6]. The most important results were presented at the International Symposium on Hydromechanically Loaded Shells, in Honolulu, Hawaii, USA, 1971 [7], [8] and [9]. Stimulated by the positive opinion of Russian navy experts about the new approach to the solution of complex submarine pressure hull problems by matrix methods and computer applications, and in response to our presentation at the previously mentioned symposium, the Ship Research Institute published a book under the title *Theory of Shells of Revolution* in 1971 [10]. The book includes all Croatian achievements related to the considered subject at that time.

In the period of the intensive building of submarines, experiments were performed on the pressure hull sections, as shown in Fig. 4. In 1965, the strength of a recently built submarine pressure hull was tested on the layer by water pressure. An extensive deformation measurement campaign in stepwise pressure increment and decrement was conducted. Then, a submarine pressure hull was launched in the sea and taken on the floating crane Veli Jože, which was towed by a tugboat to the aquatorium of Mljet Island. The pressure hull was then submerged to a depth of 240 m and submitted to deformation measurement on a large number of transverse rings. The measurement was performed by a cable connection between the measurement equipment mounted on the pressure hull and the equipment on the crane command position. This was the first full-scale measurement of a submerged submarine pressure hull, and it represented a great challenge.



Figure 4. A steel submarine dome model for strength testing

Some of the published papers of Croatian authors on submarine pressure hull design and construction are referred to in the *Proceedings of the International Ship Structure Congress* [11]. This is the most significant international organisation, which, through its technical committees, analyses corresponding literature published within three-year periods between two congresses and gives recommendations for further research with a critical evaluation. One of the new and complete issues on submarine pressure hull design is presented in [12].

3. Contemporary underwater structures

Besides navy submarines, with predominantly nuclear propulsion due to long periods submerged and passing below ice in the polar area, there is nowadays the need to build industrial underwater vessels for sea bottom investigation, the inspection of offshore structures and underwater installations, as well as submarines for touristic sightseeing, Fig. 5, [13]. There is also the interesting idea of building merchant submarines for container and oil transportation with the advantage of possible operation in polar areas. Nowadays, pressure vessels are used in offshore technology for underwater installations with accommodation spaces, as for instance drilling rigs, Fig. 6.

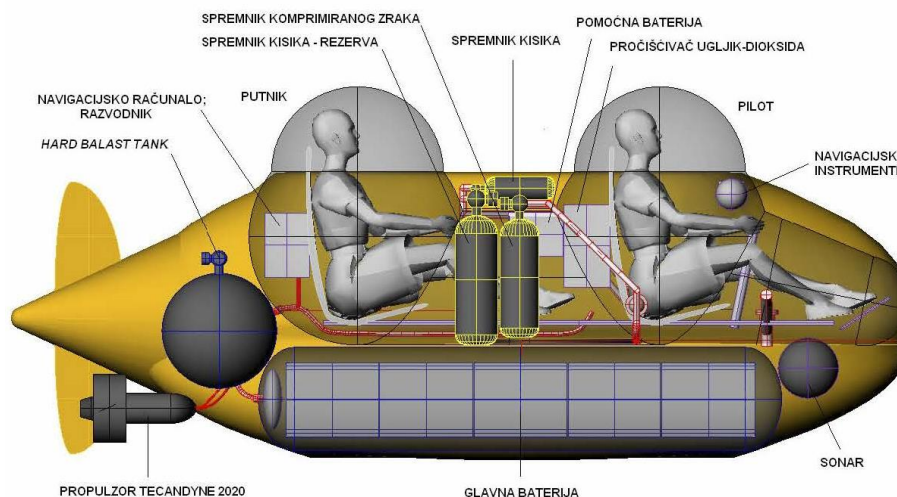


Figure 5. Autonomous recreation underwater vehicle

It is well known that nowadays navy submarines are not built in Croatia, and they will probably not be built here in the future since Croatia is a member of NATO. Therefore, this very interesting and challenging subject is reduced to the academic area. Hence, a course on submarine construction and design was introduced into the education programme in Naval Architecture studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture of the University of Zagreb. A large number of student programmes in this subject have been developed and some degree theses have been written [12]. The strength analysis of a submarine pressure hull as an assembly of spherical segments has been performed, Fig. 7 [13]. Such a design solution contributes to transverse hull strength and shell stability so that the scantlings of necessary rings are reduced. The reinforced cylindrical segment of a submarine pressure hull between transverse bulkheads exposed to hydrostatic pressure can collapse due to a loss of stability in a few ways: due to axisymmetric collapse, shell buckling between rings, or general instability, Fig. 8.

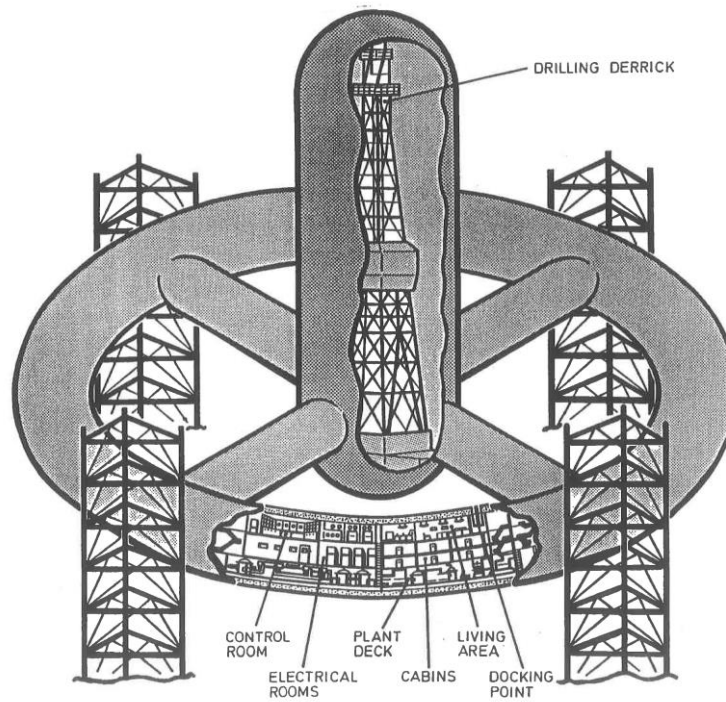


Figure 6. Underwater drilling rig

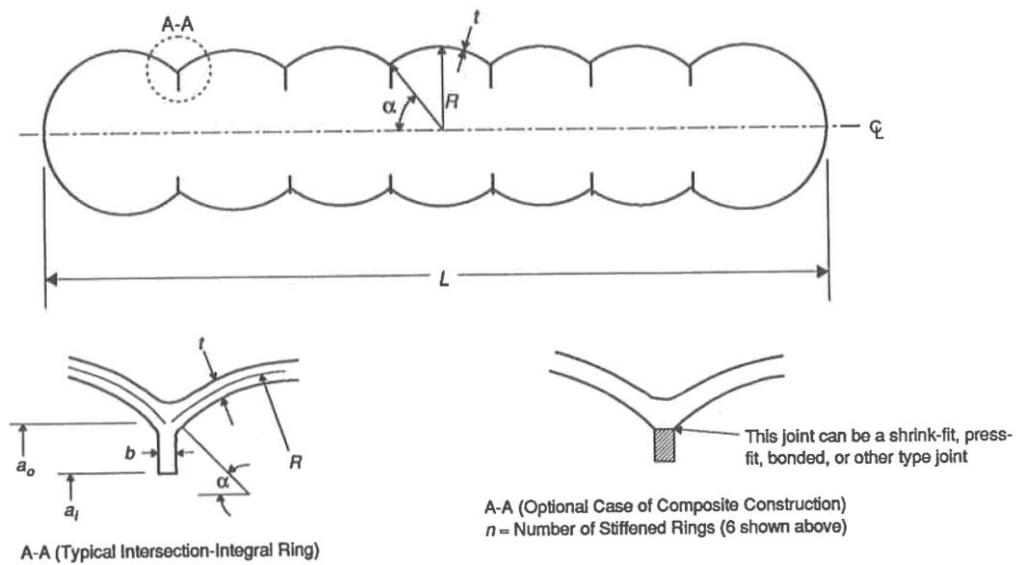


Figure 7. Submarine pressure hull consisting of spherical elements

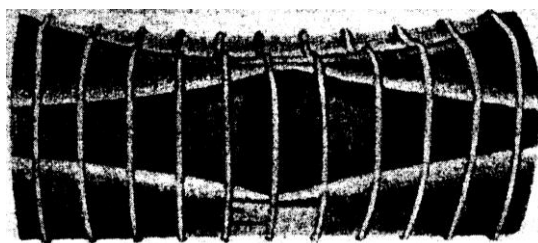


Figure 8. Failure mode in general instability

Strength analysis and optimisation of the Typhoon class of submarine is especially interesting due to its complexity. In order to increase capacity and satisfy different strength criteria, the pressure hull consists of 5 pressure compartments, which represent a unique design solution, Figs. 9, 10 and 11 [14]. This submarine is the largest in the world with an operating radius of 8,300 km. It is equipped with 20 R -39 missiles, each carrying 10 nuclear warheads of 84 tons. Up to now, 6 submarines of the Typhoon class have been built, with main particulars $L \times B \times H = 175 \times 23.3 \times 25$ m and a displacement of 48,000 tons.



Figure 9. View of the Typhoon submarine in perspective

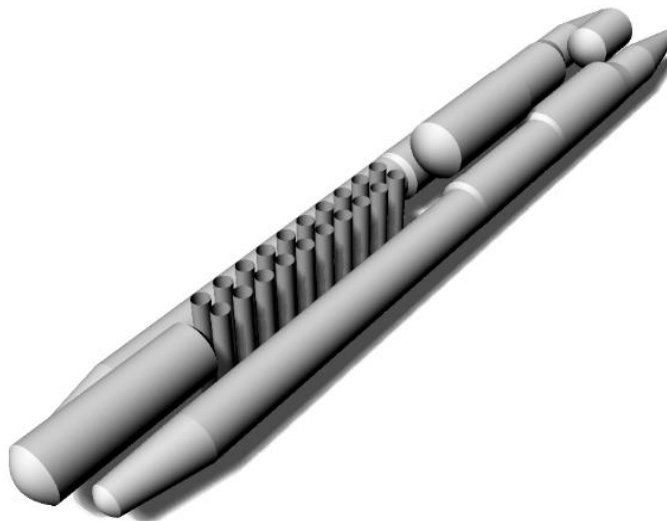


Figure 10. Compartments of the Typhoon submarine pressure hull with 20 missile launchers

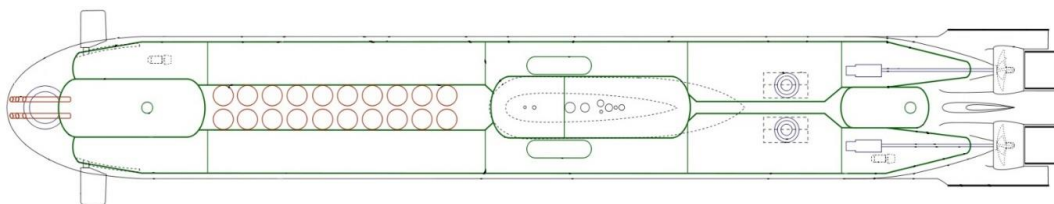


Figure 11. General arrangement of the Typhoon submarine pressure hull

Related to the operation of a submarine, the influence of an underwater explosion on the ship structure is a very interesting and challenging problem. A no-contact underwater explosion manifests itself as a series of pulsating gas bubbles. The first bubble is of very high intensity, while the second one, which occurs within one second, is not so strong. This shock causes the whipping of the ship structures, resulting in local damage and the possible collapse of the ship hull due to the sudden increase in bending moment. This problem has been analysed in a large number of papers which are considered by the *International Ships and Offshore Structures Congress* (ISSC). Among the first publications, it is worth mentioning the article of Croatian authors presented at the International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology in Trondheim in 1994 [15]. A theoretical consideration is outlined and the numerical results and measured results on two steel ships ($L=43$ m, $D=215$ tons; $L=46$ m, $D=195$ tons) performed by the Ship Research Institute in Zagreb are analysed and correlated.

The problem of underwater explosion is still a challenging subject of investigation. Extensive computer applications in engineering, with almost unlimited possibilities, have led to the rapid development of new computer-oriented numerical methods known as Computational Fluid Dynamics (CFD). In this field, articles by a team led by Professor Hrvoje Jasak at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb and the WIKKI company in London have been well acknowledged. For illustration, an example of fluid pressure distribution and expansion simulation due to an underwater explosion below the rigid plate of infinite length as a 2D problem is shown in Figs. 12 and 13 [16].

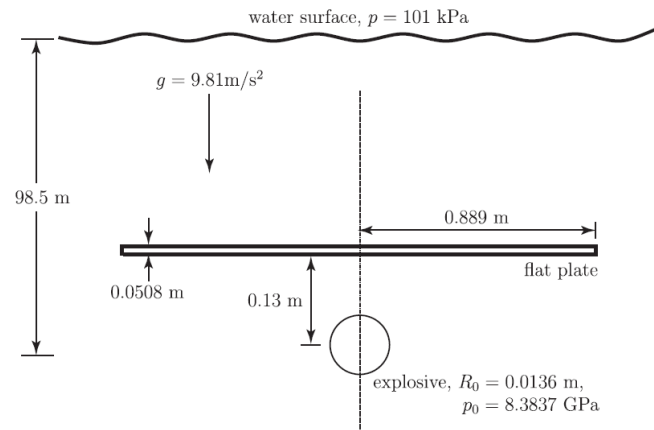


Figure 12. Basic data for the numerical simulation of an underwater explosion below the flat plate

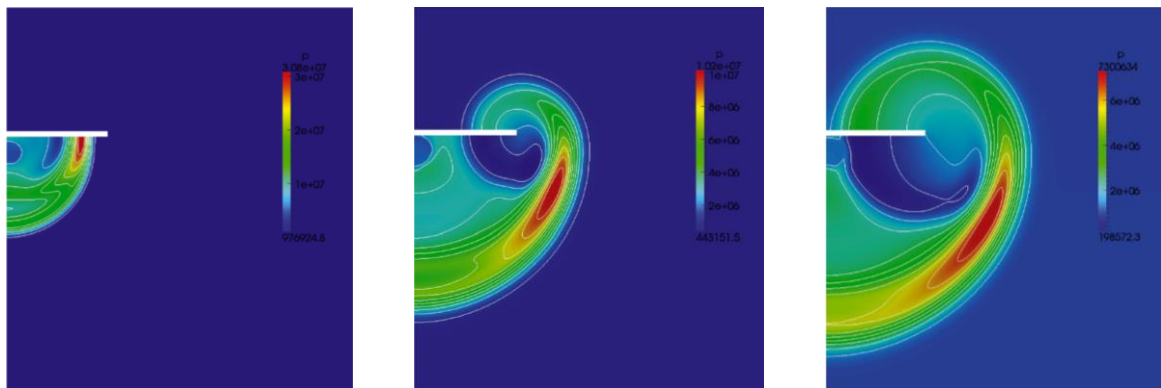


Figure 13. Fluid pressure distribution and expansion due to an underwater explosion below the rigid plate in time sequences $t=0.4, 0.8$ and 1.0 ms

4. Cargo tanks on Liquefied Gas Carriers

The wide accumulated experience in submarine pressure hull design from 1960 until 1990 is used for cargo tank design on Liquefied Petroleum Gas Carriers (LPG) at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Fig. 14 [17].

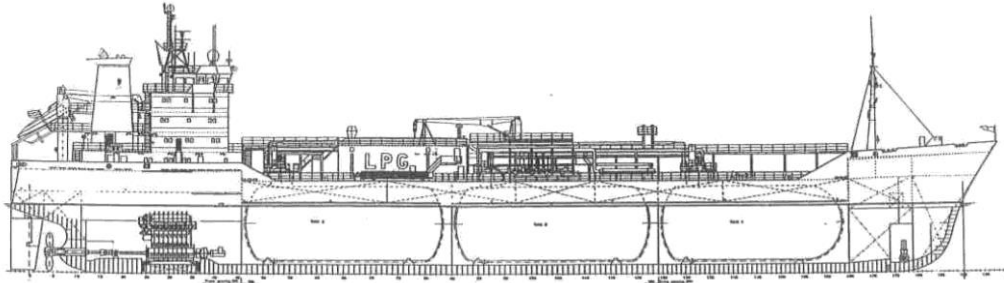


Figure 14. General arrangement of an 8,350 m³ LPG Carrier

For the German Hartmann Reederei shipping company, cylindrical and bilobe cargo tanks of the C type have been designed for a few vessels. The characteristics of C type tanks are the high pressure of 4.5 bar and a working temperature in a range from -104 °C to +45 °C. These tanks are made of high tensile steel. They are independent and supported by two arch cradles covered with a special wood layer and placed on the ship bottom, Fig. 15. The tanks consist of a reinforced cylindrical part and spherical or torispherical domes. The tank structure stability against buckling is checked on account of possible vacuum conditions during the unloading of cargo. Strength analysis is performed by the finite element method (FEM). One 3D FEM model of the complete ship hull and cargo tank structures is illustrated in Fig. 16. After the completion of tank construction, geometrical imperfection is measured and in the case of larger discrepancies additional reinforcements are built in, Fig. 17, [18]. Finally, the cargo tanks are tested under increased pressure with respect to the service pressure.

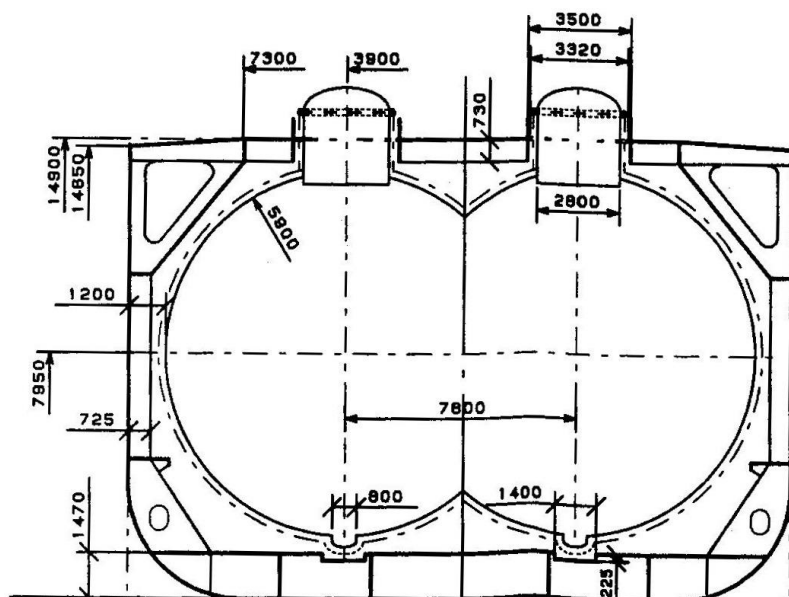


Figure 15. Site of a bilobe cargo tank in a ship hull

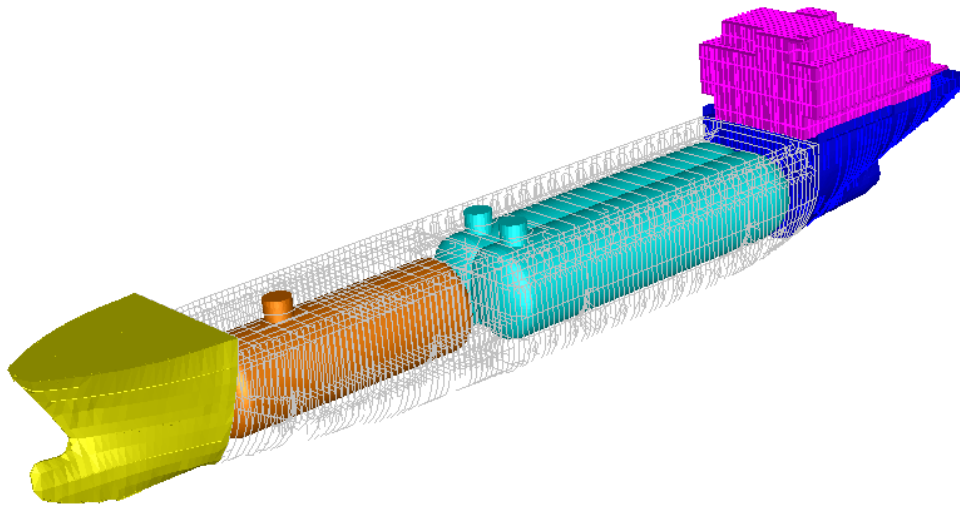


Figure 16. Global 3D FEM model of LPG carrier structure and cargo tank structure



Figure 17. Bilobe cargo tank with local head reinforcements

In order to reduce the sloshing of liquefied gas in the tank, swash bulkheads as reinforced perforated plates are built in, Fig. 18. Nowadays, it is possible to simulate sloshing in the tank by applying sophisticated hydrodynamic numerical methods, Fig. 19.

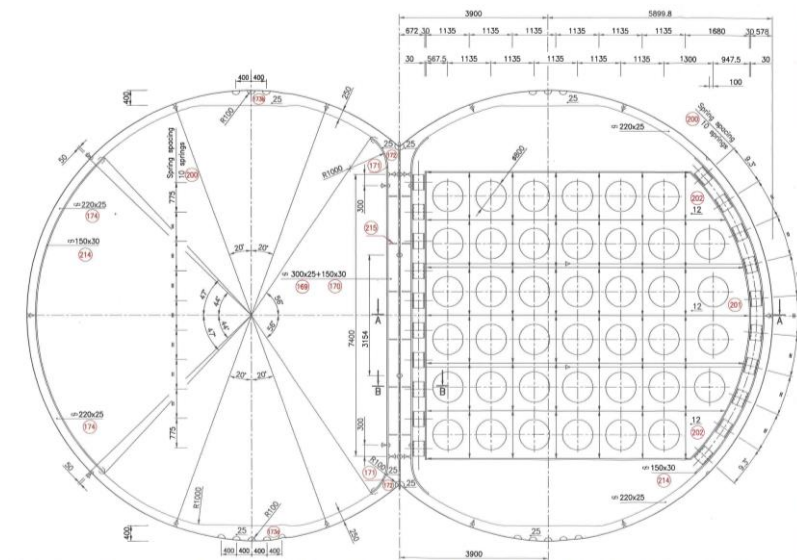


Figure 18. Swash bulkhead in a bilobe cargo tank

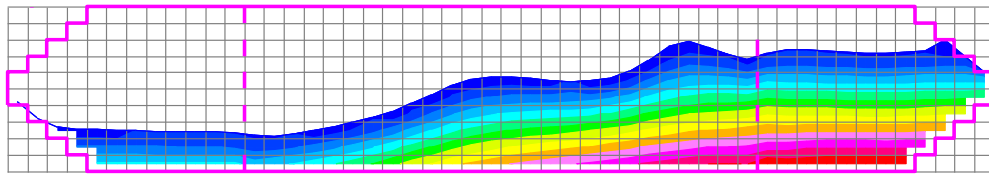


Figure 19. Simulation of sloshing in a cargo tank

LPG Carriers for the Hartmann Reederei ship owner are built in the Turnu Severin Shipyard on the Danube River in the class of Germanischer Lloyd (GL), and cargo tanks in the Fecne factory in Bucharest according to GL and USCG (The United States Coast Guard) rules. The factory was built in Ceausescu's time for the production of heavy nuclear power plant components for the needs of the Eastern Block. Today, the factory is partly the property of a Swedish company and is named Kvaerner-Fecne.

Deck cylindrical tanks for liquefied gas with a capacity up to 400 m^3 and a high working pressure of 18 bar and a temperature of $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ are designed for the Norwegian company Hamworthy. These tanks are installed on ships built in the South Korean shipyard of Hyundai Heavy Industries. One such tank of 400 m^3 is shown in Fig. 20, and its location on the deck of an $82,000 \text{ m}^3$ LPG Carrier can be seen in Fig. 21.



Figure 20. Cylindrical deck tank of 400 m^3



Figure 21. A 82,000 m³ LPG Carrier

5. Conclusion

The Republic of Croatia has a very long tradition in submarine building, and with some inventions and improvements in design and production by Croatian scientists and experts it has contributed to submarine development in the world. Submarines can be built only by countries with highly educated engineers and with a broad spectrum of activities and developed shipbuilding and related industries. With these prerogatives, Croatia is one of the few countries which are able to produce such high-tech units. Submarine building for such a small country as Croatia in terms of the number of habitants and level of development is comparable to the space programme in the USA.

Submarine building in Croatia ceased after its independence and following its membership of NATO. However, the gained experience in submarine design and production is used nowadays for cargo tank design for liquefied gas transportation, since in both cases thin shell structures are considered. The design of such sophisticated thin-walled structures is a challenging task in engineering practice.

For the time being, tanks for liquefied gas transportation are designed for foreign companies. The Croatian shipbuilding industry, searching for special and sophisticated ships and offshore structures in world production, should consider the possibility of building Liquefied Gas Carriers. Related to the planned LNG terminal on Krk Island, ships of this type could also be built for domestic needs [19] and [20].

Literature

1. Korbar, A.: A Bit More on Subs, Laurana, Zagreb, 2009.
2. Korbar, A.: Hundred years of submarine production, Symposium SORTA, Trogir, 2002.
3. Senjanović, I.: Scientific support to submarine pressure hull development, Brodogradnja 50 (2002) 4, 471-474 (in Croatian).
4. Novozhilov, V.V.: Thin Shell Theory, P. Noordhoff Ltd., Groningen, The Netherlands, 1964.
5. Senjanović, I.: Some new methods for strength analysis of shells of revolution subjected to uniform pressure, PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 1970 (in Croatian).
6. Štulhofer, D.: Design methodology of reinforced cylindrical shell under uniform external pressure, PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 1980 (in Croatian).

7. Hydromechanically Loaded Shells, Proceedings of the 1971 Symposium of the International Association for Shell Structures, Pacific Symposium Part I, Editor Rudolph Szilard, The University Press of Hawaii, Honolulu, 1971.
8. Štulhofer, D.: Stress analysis of a circular cylindrical shell, reinforced by equally spaced ring frames under uniform pressure, IASS Symposium, Honolulu, Hawaii, 1971.
9. Senjanović, I.: Derivation of the complete differential equation of the toroidal shell under uniform loading and its solution by means of digital computer, IASS Symposium, Honolulu, Hawaii, 1971.
10. Senjanović, I.: Theory of Shells of Revolution, Brodarski institut, Zagreb, 1972.
11. Proceedings of the Seventh International Ship Structures Congress, Paris, 1979.
12. Grubišić, R., Mitrov, D.: Strength analysis of submarine pressure hull, Brodogradnja 46 (1998) 1, 30-39.
13. Submersible Vehicle Systems Design, Editor E. Eugene Allmendinger, SNAME, 1990.
14. Šabalja, T., Senjanović, I., Hadžić, N.: Structural design of a Typhoon Class Submarine, 21. Simpozij SORTA, Baška – otok Krk, 2014.
15. Smiljanić, B., Bobanac, N., Senjanović, I.: Bending moment of ship hull girder caused by pulsating bubble of underwater explosion, Hydroelasticity in Marine Technology, Faltinsen et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, 1994.
16. Miller, S.T., Jasak, H., Boger, D.A., Paterson, E.G., Nedungadi, A.: A pressure-based, compressible, two-phase flow finite volume method for underwater explosions, Computers & Fluids 87 (2013) 132-143.
17. Senjanović, I., Mravak, Z., Slapničar, V., Gospić, I.: Structure design of bilobe cargo tanks in liquefied gas carriers, Brodogradnja 50 (2002) 3, 323-334.
18. Senjanović, I., Rudan, S., Ljuština, A.M.: Remedy for misalignment of bilobe cargo tanks in petroleum gas carriers, Journal of Ship Production, Vol. 20, No. 3, 2004, pp. 133-146.
19. Senjanović, I., Hadžić, N.: Potentials of the Croatian Shipbuilding Industry, Proceedings of Symposium Development Potentials of the Croatian Economy, The Croatian Academy of Sciences and Arts, Zagreb, 2014 (in Croatian).
20. Liščić, B., Čorić, V., Reljić, S., Klarin, B., Hadžić, N., Vukić, Z.: Offshore Technology – Perspective Field for the Republic of Croatia, Department of Technical Sciences of the Croatian Academy of Sciences and Arts, Bulletin, No. 1, 2014 (in Croatian).

O osnivanju čvrstog trupa podmornice i primjeni stečenih iskustava na osnivanje suvremenih ljuskastih konstrukcija

Ivo Senjanović, Nikola Vladimir

*Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, ivo.senjanovic@fsb.hr*

1. Uvod

Ideja o podmornici kao ratnom brodu ostvarena je tek početkom XX. stoljeća kada su se ispunili potrebni uvjeti, tj. razvoj metalurgije, akumulatora električne energije, dizelskog motora i torpeda. Francuska je prva uvela podmornice u sustav svoje ratne mornarice 1893. godine, a zatim su slijedile Italija 1896., SAD 1900. i Velika Britanija 1901., te Rusija, Švedska, Njemačka i Japan 1904. godine. Austro-Ugarska Monarhija se ovoj skupini zemalja pridružila 1904. godine. U početku su se podmornice gradile u Budimpešti, a zatim u Rijeci i Puli. Detaljan prikaz razvoja podmorničarstva u svijetu predstavljen je u knjizi [1].

Hrvatska brodogradnja ima kontinuiranu stogodišnju tradiciju gradnje podmornica počevši od potreba Austro-Ugarske, preko Italije i Njemačke do bivše Jugoslavije, [2]. U Rijeci je izrađeno prvo torpedo prema zamisli Ivana Vukića s pogonskim motorom i kompresorom. Time je Hrvatska znatno pridonijela stvaranju preduvjeta za razvoj podmorničarstva u svijetu. Novi poticaj za razvoj podmornica dali su izumi šnorkla, akumulatorske baterije povećanog kapaciteta, raketno oružje i u novije vrijeme nuklearni pogon.

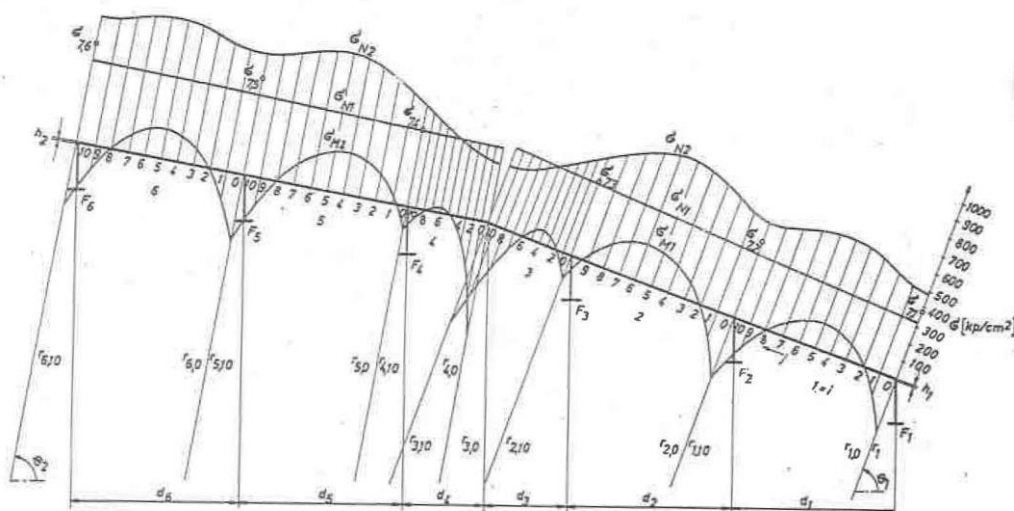
U *Brodarskom institutu* u Zagrebu krajem 1967. godine oformljena je snažna skupina za istraživanje, razvoj i projektiranje podmornica. U *Brodoprojektu* u Rijeci osnovan je odjel za razradu izradbene tehničke dokumentacije, a u *Brodosplitu* u Splitu izgrađen je proizvodni pogon *Brodogradilište specijalnih objekata*. Zahvaljujući velikim ulaganjima u istraživanje i razvoj usvojena su nova znanja i stvoren je kadrovski potencijal znanstvenika i stručnjaka. U svim područjima potrebnim za uspješno projektiranje i gradnju podmornica postignut je zapažen uspjeh. Posebno je vrijedno spomenuti konstrukciju čvrstog trupa podmornice, područje hidroakustike, automatizacije, tehnologije gradnje i održavanje životnih uvjeta.

Namjera ovog kratkog prikaza je istaknuti na kojoj su se znanstvenoj razini riješavali problemi osnivanja čvrstog trupa podmornica u *Brodarskom institutu* i oteti od zaborava domaće stručnjake koji su za to bili zaslužni, [3].

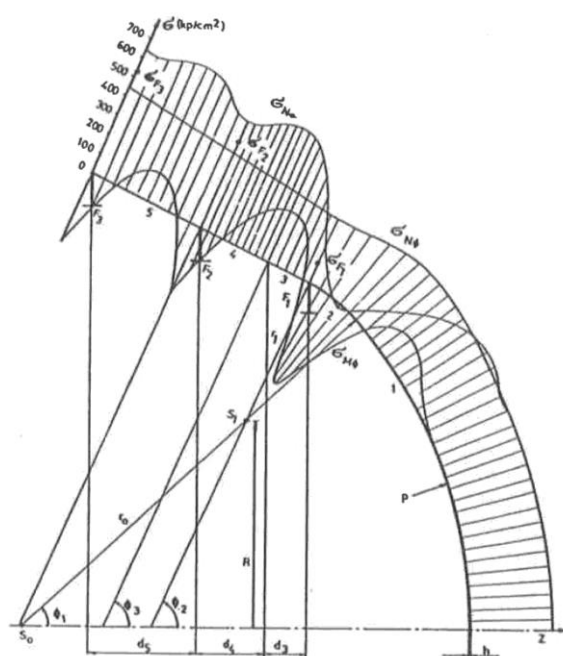
2. Hrvatsko iskustvo

Osnivanje čvrstog trupa podmornice jedan je od bitnih segmenata projektiranja čitavog autonomnog sustava podmornice. Snažan razvoj rješavanja ove problematike na znanstvenoj osnovi uslijedio je u *Brodarskom institutu* u Zagrebu 1967. godine. Razvijene su matrične metode (kao preteća danas opće prihvaćenoj metodi konačnih elemenata) za proračun sklopova konstrukcije podmornice: spojevi orebrenih konusnih ljuski, sl. 1; krajevi sastavljeni od orebrene konusne ljuske i sfernog čela s torisferičnim prijelazom, sl. 2. Metode su zasnovane na ruskoj školi teorije ljusaka (Vlasov, Goldenweiser, Novožilov [4] i dr.). Razvijeni su i odgovarajući računalni programi za proračun problema na elektroničkom računalu. Korišteno je jedno od prvih digitalnih računala instalirano u *Institutu Ruđer Bošković* u Zagrebu.

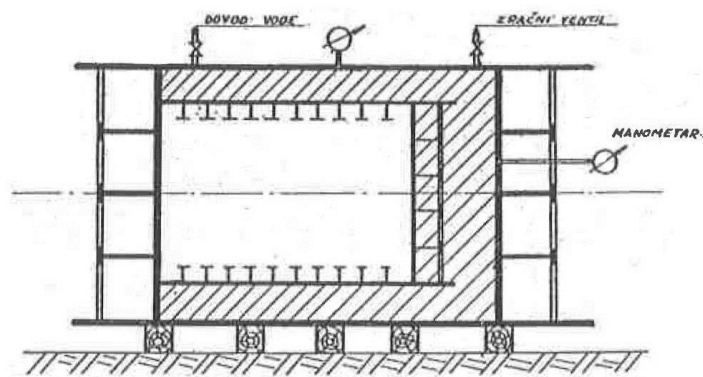
U to vrijeme postojala je međudržavna vojna suradnja između tadašnje Jugoslavije i Sovjetskog Saveza. Ruski vojni stručnjaci prenosili su svoja iskustva u osnivanju konstrukcije podmornice domaćim inženjerima. To se odnosilo na metode proračuna čvrstoće i stabilnosti ljsaka, proračunsko opterećenje konstrukcije podmornice i rezervu čvrstoće, principe racionalnog projektiranja sklopova konstrukcije kao što su oplata i orebrenje čvrstog trupa, čela podmornice, poprečne pregrade, toranj, te probleme čvrstoće detalja konstrukcije kao što su ojačanja uz prolaze i otvore na trupu. Čvrstoća i stabilnost sekcija podmornice provjeravana je ispitivanjem u tlačnoj posudi, sl. 3.



Slika 1. Raspodjela komponenata naprezanja u konusnom dijelu čvrstog trupa podmornice



Slika 2. Raspodjela komponenata naprezanja u čelu podmornice



Slika 3. Tlačna posuda za ispitivanja sekcija podmornice

U vrijeme „hladnog rata“ postojala je zabrana izvoza elektroničkih računala u SSSR, pa su ruski znanstvenici razvili pojednostavljena analitička rješenja složenih problema teorije ljsaka. Numerička rješenja složenih problema čvrstoće čvrstog trupa podmornice pomoću računala i općenito mogućnosti koje pruža računalo, bili su ugodno iznenađenje za ruske vojne stručnjake.

Nova postignuća na području analize čvrstoće i projektiranja čvrstog trupa podmornice obrađena su u dvijema doktorskim disertacijama, [5] i [6]. Najznačajniji rezultati predstavljeni su na međunarodnom skupu *International Association for Shell Structures*, održanom u Honolulu, Hawaii, SAD, 1971, [7], [8] i [9]. Potaknut pozitivnim mišljenjem ruskih vojnih stručnjaka o novom pristupu rješavanju problema čvrstoće čvrstog trupa podmornice pomoću matričnih metoda na elektroničkom računalu i odjekom na radove prezentirane na prethodno spomenutom skupu, *Brodarski institut* objavio je 1972. godine knjigu *Theory of Shells of Revolution*, u kojoj su prikazana sva tadašnja hrvatska postignuća na tom području, [10].

U razdoblju intenzivne gradnje podmornica obavljena su i određena ispitivanja čvrstoće sklopova čvrstog trupa podmornice na modelima kakav je prikazan na sl. 4. Godine 1965. ispitana je čvrstoća upravo izgrađenog trupa podmornice tlačenjem na ležaju. Izvršena su opsežna mjerenja deformacija pri stepenastom porastu i padu tlaka. Nakon toga, trup podmornice je porinut u more i podignut na plovnu dizalicu *Veli Jože*, koja je remorkerom otegljena u akvatorij otoka Mljeta. Tamo je trup podmornice spušten u more do dubine od 240 m i podvrgnut mjerenjima deformacija na većem broju poprečnih rebara. Mjerenje je provedeno kabelskom vezom između mjernih uređaja na trupu podmornice i onih na dizalici, s koje se ujedno upravljalo mjerenjem. Ovo je bilo prvo ispitivanje u naravi uranjanjem trupa u more i predstavljalo je velik i uzbudljiv pothvat.

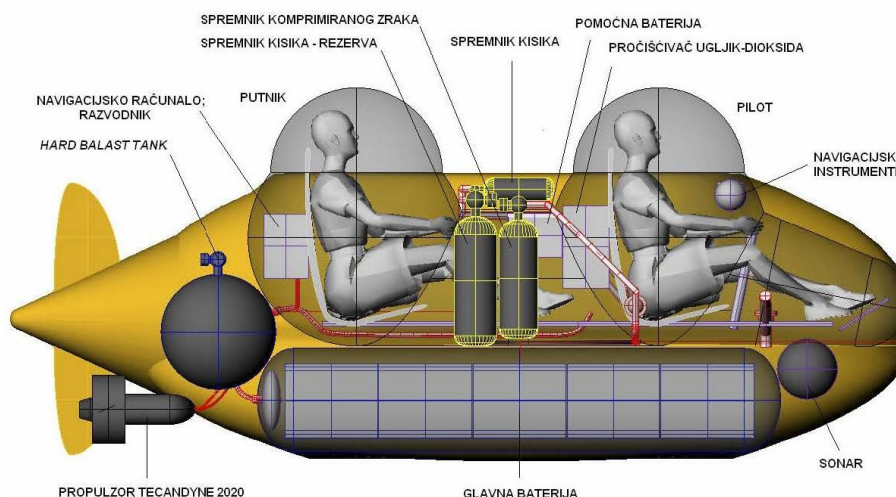


Slika 4. Čelični model čela podmornice za ispitivanje čvrstoće

Neki od objavljenih radova hrvatskih autora s područja konstrukcije podmornica referirani su u zborniku 7. *Međunarodnog kongresa za brodske konstrukcije* (ISSC), [11]. Radi se o najznačajnijoj međunarodnoj udruzi, koja preko svojih tehničkih komiteta obrađuje literaturu objavljenu u trogodišnjem međukongresnom razdoblju i uz kritičku ocjenu daje svojevrstne smjernice za daljnja istraživanja. Jedan suvremeniji pogled na čitavu problematiku vezanu uz osnivanje konstrukcije čvrstog trupa podmornice prikazan je u [12].

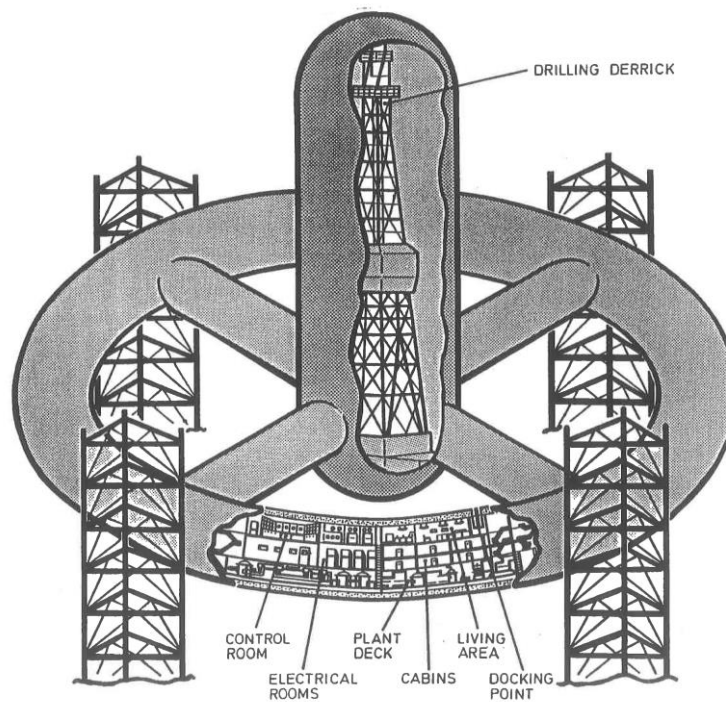
3. Suvremene podvodne konstrukcije

Osim ratnih podmornica, pretežno na nuklearni pogon zbog mogućnosti dugotrajne plovidbe u zaronjenom stanju i prolaska ispod leda u polarnom području, danas postoji potreba i za gradnjom industrijskih ronilica za istraživanje podmorja i inspekciju pomorskih objekata i podmorskih instalacija, kao i podmornica za turističke namjene, sl. 5, [13]. Pojavljuje se i ideja o gradnji trgovačkih podmornica za prijevoz kontejnera i nafte, čija je prednost također u mogućnosti plovidbe u polarnom području. U novije vrijeme posude pod tlakom koriste se u pomorskoj tehnici za podvodne instalacije s nastambama kao što je na primjer podvodni bušaći toranj, sl. 6.

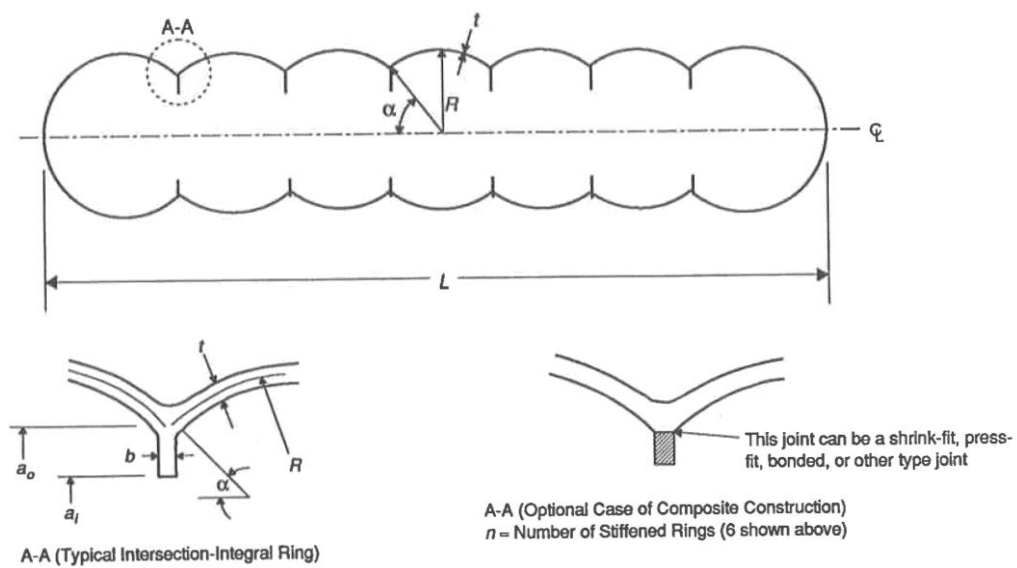


Slika 5. Autonomna rekreacijska ronilica

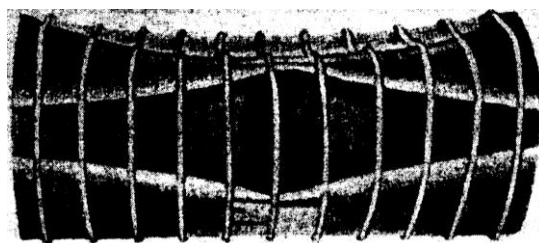
Poznato je da se podmornice za vojne namjene više ne grade u Hrvatskoj, a ulaskom u NATO savez vjerojatno više ni neće. Bavljenje ovim vrlo zanimljivim i izazovnim područjem svelo se u akademske granice, gdje se u okviru kolegija *Konstrukcija i čvrstoća podmornica* izučavaju na FSB-u u Zagrebu podmornice i ronilice. Napravljeno je na desetke studentskih programa i poneki diplomski rad, [12]. Među ostalim analizirana je čvrstoća čvrstog trupa podmornice u izvedbi niza sfernih segmenata, koji ujedno povećavaju poprečnu čvrstoću i stabilnost plašta protiv izvijanja, sl. 7, [13]. Orebrani cilindrični dio čvrstog trupa podmornice između pregrada može se urušiti zbog gubitka stabilnosti pod djelovanjem hidrostatičkog tlaka na više načina: aksijalnosimetrični kolaps, izvijanje ljuske između rebara ili gubitak opće stabilnosti, sl. 8.



Slika 6. Podvodni bušaći toranj



Slika 7. Čvrsti trup podmornice kao sklop sfernih segmenata

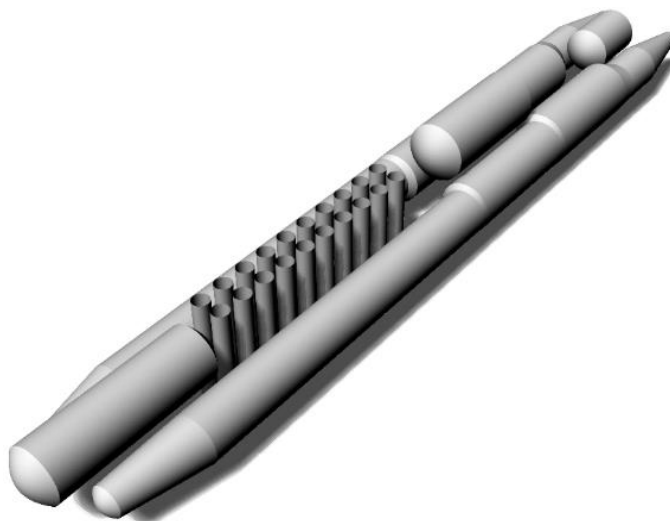


Slika 8. Opći kolaps orebrene cilindrične ljuske

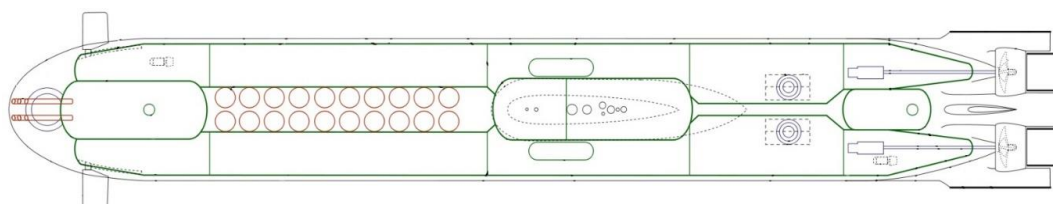
Posebno je zanimljiva analiza čvrstoće i optimizacija podmornice klase Typhoon uslijed složenosti konstrukcije. U namjeri da se poveća kapacitet podmornice i zadovolje zahtjevni kriteriji čvrstoće, čvrsti trup se sastoji od 5 ljuskastih segmenata što predstavlja jedinstveno rješenje, sl. 9, 10 i 11, [14]. Ovo je najveća podmornica na svijetu s radijusom plovidbe od 8300 km. Opremljena je s 20 R-39 raketa, od kojih svaka nosi 10 nuklearnih bojnih glava mase od 84 tone. Do sada je izgrađeno 6 podmornica klase Typhoon glavnih izmjera $L \times B \times H = 175 \times 23.3 \times 25$ m i istisnine 48000 tona.



Slika 9. Izgled podmornice klase Typhoon



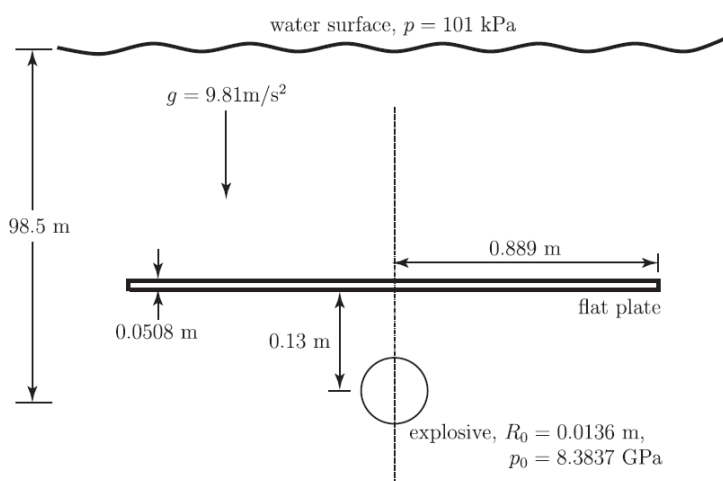
Slika 10. Segmenti čvrstog trupa podmornice klase Typhoon s cijevnim raketnim lanserima



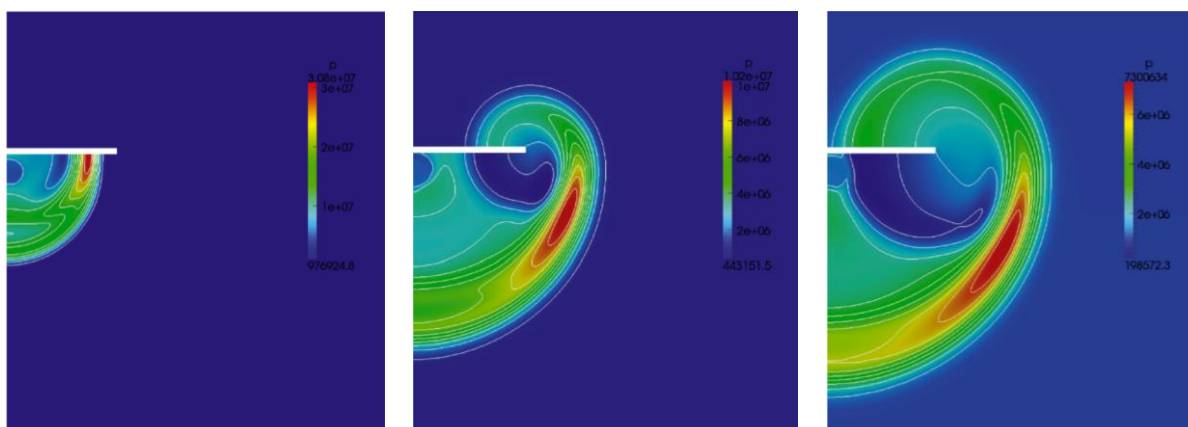
Slika 11. Opći plan segmenata čvrstog trupa podmornice klase Typhoon

U području podmorničarstva zanimljiv je problem analize utjecaja podvodne eksplozije na brodsku konstrukciju. Nekontaktna podvodna eksplozija manifestira se primarno kao udarni val tlaka, iza kojeg unutar jedne sekunde slijedi sekundarni val manjeg intenziteta. Ovo izaziva podrhtavanje konstrukcije brodova uz moguća lokalna oštećenja i lom trupa uslijed trenutnog povećanja momenta savijanja. O ovom problemu objavljeno je mnoštvo radova, koji se prate u okviru rada *International Ships and Offshore Structures Congress* (ISSC). Među prvim publikacijama vrijedno je spomenuti rad hrvatskih autora prezentiran na međunarodnoj konferenciji *Hydroelasticity in Marine Technology* u Trondheimu 1994., [15]. Rad uključuje teorijska razmatranja, rezultate proračuna i mjerenja za dva broda ($L=43$ m, $D=215$ t; $L=46$ m, $D=195$ t) provedenih od strane *Brodarskog instituta* u Zagrebu, i njihovu usporedbu.

Problem podvodnih eksplozija još uvijek je vrlo aktualan za znanstvena istraživanja. Široka primjena računala u tehnici, s gotovo neograničenim mogućnostima, potakla je nagli razvoj novih računalno usmjerenih numeričkih metoda (*Computational Fluid Dynamics* (CFD)). U ovom području zapaženi su radovi prof. H. Jasaka i njegove istraživačke grupe na FSB-u i u tvrtci WIKKI u Londonu. Za ilustraciju navodi se primjer simulacije raspodjele i širenja tlaka u fluidu uslijed podvodne eksplozije ispod beskonačno duge krute ploče, sl. 12 i 13, [16].



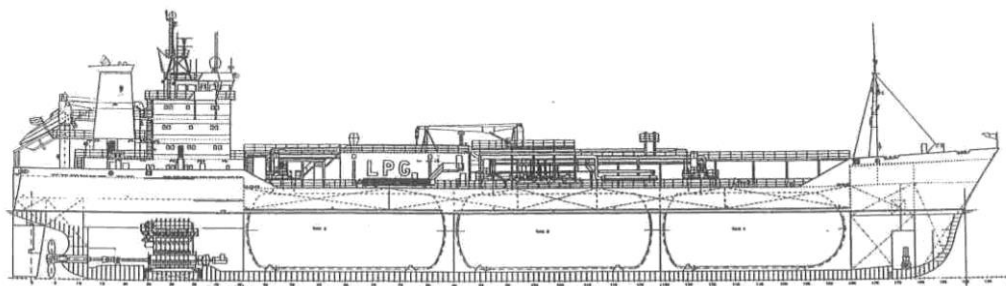
Slika 12. Osnovni podaci za analizu utjecaja podvodne eksplozije na ravnu ploču



Slika 13. Raspodjela i širenje tlaka fluida uslijed podvodne eksplozije ispod krute ploče $t=0.4$, 0.8 i 1.0 ms

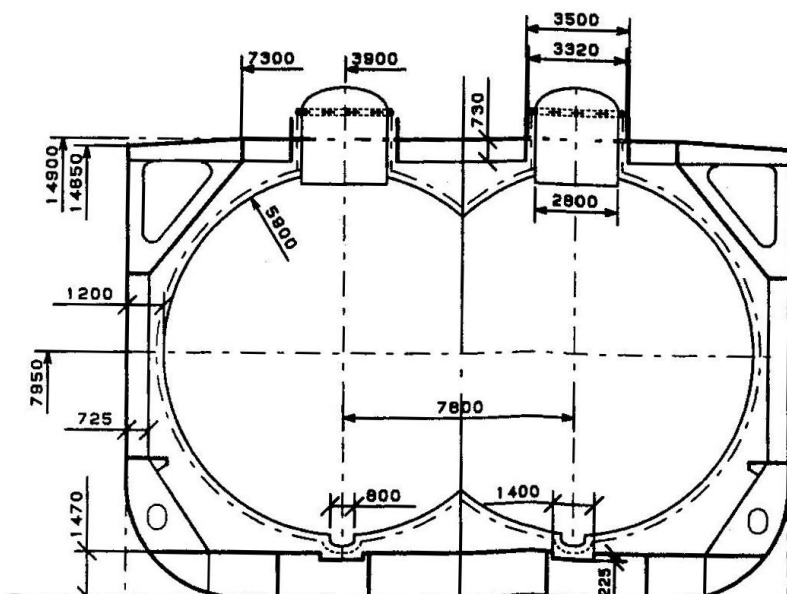
4. Spremnici na brodovima za prijevoz ukapljenog plina

Bogato iskustvo stečeno u osnivanju čvrstog trupa podmornica u razdoblju od 1960. do 1990. godine iskorišteno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u projektiranju spremnika na LPG brodovima (Liquefied Petroleum Gas Carriers) [17], sl. 14.

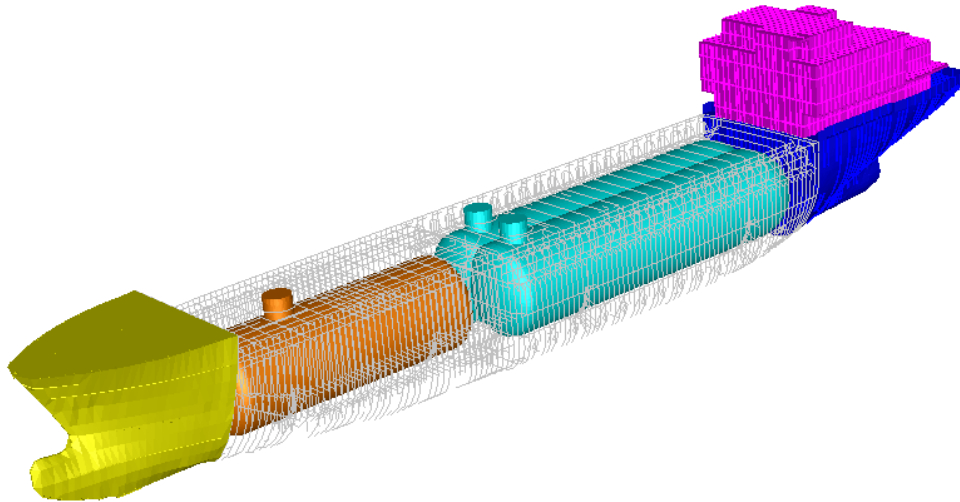


Slika 14. Brod za prijevoz ukapljenog plina, LPG od 8350 m³

Za njemačku brodarsku tvrtku *Hartmann Reederei* projektirani su jednocilindrični i dvocilindrični spremnici tereta tipa C za nekoliko brodova. To su spremnici pod visokim tlakom do 4.5 bara i radnom temperaturom u rasponu od -104 °C do +45 °C. Izrađuju se od čelika povišene čvrstoće. Spremnici su nestrukturani i oslanjaju se na dno broda preko dviju kolijevki obloženih specijalnim drvetom, sl. 15. Sastoje se od orebrenog cilindričnog dijela i sferičnih odnosno torisferičnih čela. Konstrukcija se provjerava i na izvijanje zbog mogućeg podtlaka pri istovaru tereta. Proračun se vrši metodom konačnih elemenata, sl. 16. Nakon izrade provjeravaju se geometrijska odstupanja i prema potrebi ugrađuju dodatna ojačanja [18], sl. 17. Nakon toga spremnici se ispituju pod povišenim tlakom.



Slika 15. Smještaj dvocilindričnog spremnika

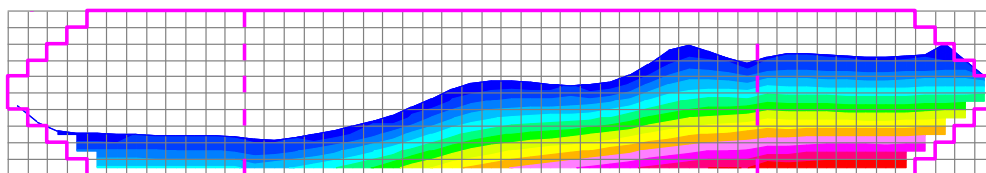
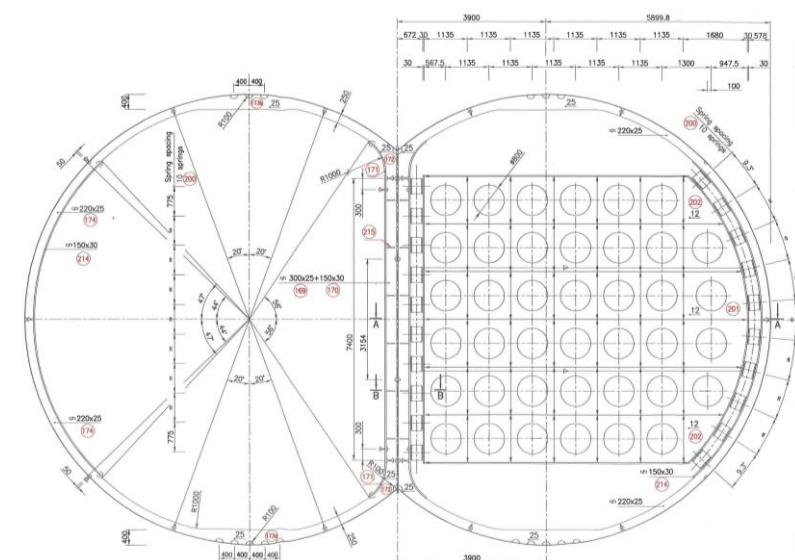


Slika 16. Globalni model konačnih elemenata brodske konstrukcije i spremnika



Slika 17. Izgrađeni dvocilindarski spremnik s lokalnim ukrućenjem

Da bi se smanjilo zapljuskivanje ukapljenog plina u spremniku, ugrađuju se pljuskalice u obliku ukrepljenih perforiranih ploča kao što je prikazano na sl. 18. Danas se može, korištenjem suvremenih metoda hidrodinamike i odgovarajućih računalnih programa, simulirati zapljuskivanje tekućine u spremniku, sl. 19.



LPG brodovi za tvrtku *Hartmann Reederei* građeni su u brodogradilištu *Turnu Severin* na Dunavu u klasi Germanischer Lloyd (GL), a spremnici u tvornici *Fecne* u Bukureštu prema pravilima GL i USCG (The United States Coast Guard). Tvornica je izgrađena još u vrijeme vladavine Ceausescua za potrebe izrade teških sklopova nuklearnih elektrana za tzv. Istočni blok. Danas je u djelomičnom vlasništvu švedske kompanije i posluje pod nazivom *Kvaerner-Fecne*.





Slika 21. Brod za prijevoz ukapljenog plina, LPG od 82000 m³

5. Zaključak

Hrvatska ima vrlo dugu tradiciju gradnje podmornica, a izumima i unapređenjem projektiranja i tehnologije gradnje svojih znanstvenika i stručnjaka znatno je pridonijela razvoju podmorničarstva u svijetu. Podmornice mogu graditi samo zemlje s visoko osposobljenim kadrovskim potencijalom širokog spektra aktivnosti, te razvijenom brodograđevnom i pratećom industrijom. Zahvaljujući tim prerogativama Hrvatska se svrstala među rijetke zemlje, koje su ovladale ovom visokom tehnologijom. Gradnja podmornica za tako populacijski malu i ekonomski srednje razvijenu zemlju kao Hrvatska je usporediva s američkim svemirskim programom.

Gradnja podmornica u Hrvatskoj je zamrla nakon njenog osamostaljenja i ulaskom u NATO savez. Međutim, bogato iskustvo stečeno u osnivanju čvrstog trupa podmornica koristi se danas u projektiranje spremnika za prijevoz ukapljenog plina s obzirom da se u oba slučaja radi o ljuskastim konstrukcijama. Osnivanje takovih sofisticiranih tankostijenih konstrukcija predstavlja posebni izazov u inženjerskoj praksi.

Za sada se spremnici za ukapljeni plin projektiraju za strane naručitelje. Hrvatska brodogradnja u potrazi za nišama sofisticiranih brodova i pomorskih konstrukcija u svjetskoj brodogradnji trebala bi razmisliti o gradnji brodova za prijevoz ukapljenog plina. S obzirom na planirani LNG terminal na Krku, brodovi ovog tipa mogli bi se graditi i za vlastite potrebe, [19] i [20].

Literatura

1. Korbar, A.: Podmorničarstvo, Laurana, Zagreb, 2007.
2. Korbar, A.: Sto godina podmorničarstva, SORTA, Trogir, 2002.
3. Senjanović, I.: Znanstvena potpora razvoju konstrukcije podmornice, Brodogradnja 50 (2002) 4, 471-474.
4. Novozhilov, V.V.: Thin Shell Theory, P. Noordhoff Ltd., Groningen, The Netherlands, 1964.
5. Senjanović, I.: Neke metode proračuna tankih rotacionih ljuski pod pritiskom, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1970.
6. Štulhofer, D.: Analiza kriterija dimenzioniranja i razrada metode projektiranja cilindrične ljuske ukružene prstenastim ekvidistantnim rebrima opterećene jednolikim vanjskim pritiskom, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1980.
7. Hydromechanically Loaded Shells, Proceedings of the 1971 Symposium of the International Association for Shell Structures, Pacific Symposium Part I, Editor Rudolph Szilard, The University Press of Hawaii, Honolulu, 1971.

8. Štulhofer, D.: Stress analysis of a circular cylindrical shell, reinforced by equally spaced ring frames under uniform pressure, IASS Symposium, Honolulu, Hawaii, 1971.
9. Senjanović, I.: Derivation of the complete differential equation of the toroidal shell under uniform loading and its solution by means of digital computer, IASS Symposium, Honolulu, Hawaii, 1971.
10. Senjanović, I.: Theory of Shells of Revolution, Brodarski institut, Zagreb, 1972.
11. Proceedings of the Seventh International Ship Structures Congress, Pariz, 1979.
12. Grubišić, R., Mitrov, D.: Strength analysis of submarine pressure hull, Brodogradnja 46 (1998) 1, 30-39.
13. Submersible Vehicle Systems Design, Editor E. Engene Allmendinger, SNAME, 1990.
14. Šabalja, T., Senjanović, I., Hadžić, N.: Structural design of a Typhoon Class Submarine, 21. Simpozij SORTA, Baška – otok Krk, 2014.
15. Smiljanić, B., Bobanac, N., Senjanović, I.: Bending moment of ship hull girder caused by pulsating bubble of underwater explosion, Hydroelasticity in Marine Technology, Faltinsen et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, 1994.
16. Miller, S.T., Jasak, H., Boger, D.A., Paterson, E.G., Nedungadi, A.: A pressure-based, compressible, two-phase flow finite volume method for underwater explosions, Computers & Fluids 87 (2013) 132-143.
17. Senjanović, I., Mravak, Z., Slapničar, V., Gospić, I.: Structure design of bilobe cargo tanks in liquefied gas carriers, Brodogradnja 50 (2002) 3, 323-334.
18. Senjanović, I., Rudan, S., Ljuština, A.M.: Remedy for misalignment of bilobe cargo tanks in petroleum gas carriers, Journal of Ship Production, Vol. 20, No. 3, 2004, pp. 133-146.
19. Senjanović, I., Hadžić, N.: Potencijali hrvatske brodogradnje, Zbornik radova – Razvojni potencijali hrvatskog gospodarstva, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet, Zagreb, 2014.
20. Liščić, B., Čorić, V., Reljić, S., Klarin, B., Hadžić, N., Vukić, Z.: Morska tehnologija (Offshore Technology) – perspektivno područje za Republiku Hrvatsku, Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Bilten Razreda za tehničke znanosti, br. 1, 2014.

Okrugli stol:

Mogućnosti razvoja, proizvodnje i remonta podvodnih objekata u Republici Hrvatskoj

O osnivanju čvrstog trupa podmornice i primjeni stečenih iskustava na osnivanje suvremenih ljuskastih konstrukcija

Ivo Senjanović, Nikola Vladimir

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, ivo.senjanovic@fsb.hr, nikola.vladimir@fsb.hr

Pula, 24. svibnja 2016.

SADRŽAJ

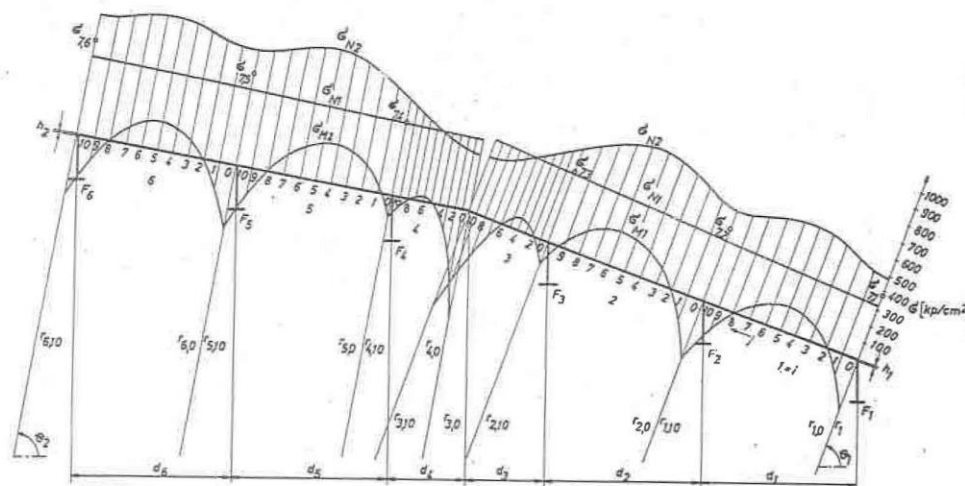
- UVOD
- HRVATSKO ISKUSTVO
- SUVREMENE PODVODNE KONSTRUKCIJE
- SPREMNICI NA BRODOVIMA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA
- ZAKLJUČAK

UVOD

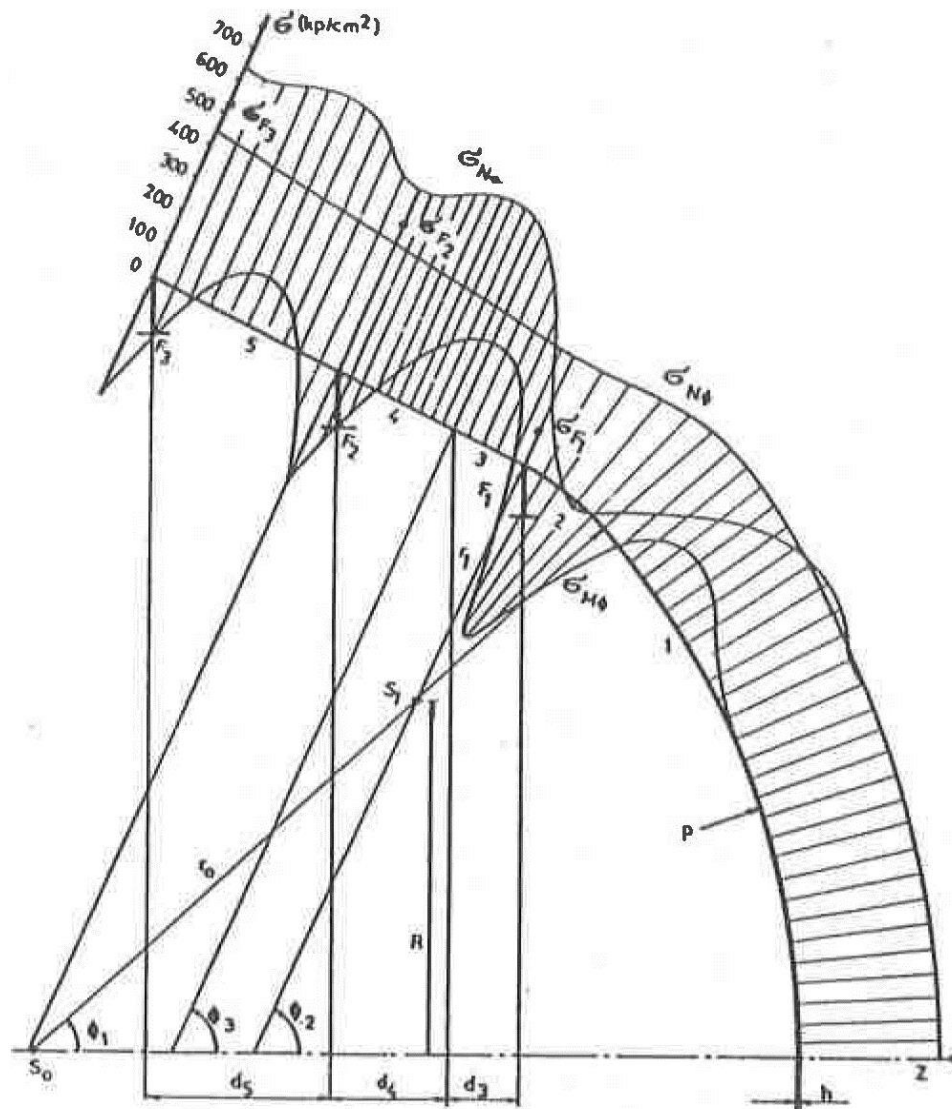
- Hrvatska brodogradnja ima kontinuiranu stogodišnju tradiciju gradnje podmornica počevši od potreba Austro-Ugarske, preko Italije i Njemačke do bivše Jugoslavije.
- U Brodarskom institutu u Zagrebu krajem 1967. godine oformljena je snažna skupina za istraživanje, razvoj i projektiranje podmornica.
- U Brodoprojektu u Rijeci osnovan je odjel za razradu izradbene tehničke dokumentacije, a u Brodosplitu u Splitu izgrađen je proizvodni pogon Brodogradilište specijalnih objekata.
- Zahvaljujući velikim ulaganjima u istraživanje i razvoj usvojena su nova znanja i stvoren je kadrovski potencijal znanstvenika i stručnjaka.
- U svim područjima potrebnim za uspješno projektiranje i gradnju podmornica postignut je zapažen uspjeh.
- Posebno je vrijedno spomenuti konstrukciju čvrstog trupa podmornice, područje hidroakustike, automatizacije, tehnologije gradnje i održavanje životnih uvjeta.

HRVATSKO ISKUSTVO

- Snažan razvoj rješavanja problema osnivanja čvrstog trupa podmornice na znanstvenoj osnovi uslijedio je u *Brodarskom institutu* u Zagrebu 1967. godine.
- Razvijene su matrične metode (kao preteća metode konačnih elemenata) za prračun sklopova konstrukcije podmornice.
- Metode su zasnovane na ruskoj školi teorije ljusaka.
- Razvijeni su i odgovarajući računalni programi za proračun problema na elektroničkom računalu.
- Korišteno je jedno od prvih digiralnih računala u *Institutu Ruđer Bošković* u Zagrebu.



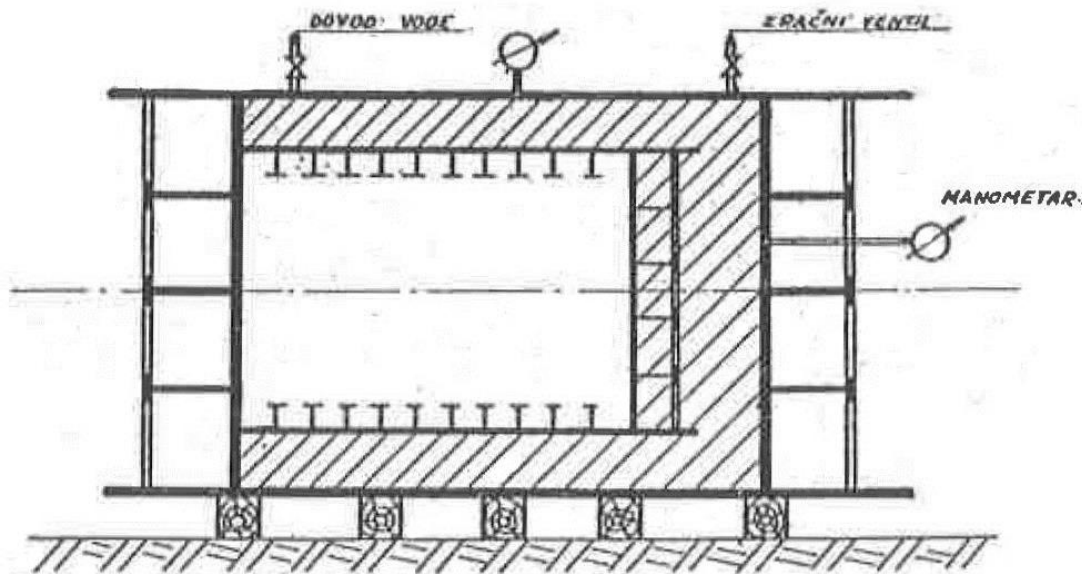
Slika 1. Raspodjela komponenata naprezanja u konusnom dijelu čvrstog trupa podmornice



Slika 2. Raspodjela komponenata naprezanja u čelu podmornice

- U to vrijeme postojala je međudržavna vojna suradnja između tadašnje Jugoslavije i Sovjetskog Saveza.
- Ruski vojni stručnjaci prenosili su svoja iskustva u osnivanju konstrukcije podmornice domaćim inženjerima.
- To se odnosilo na metode proračuna čvrstoće i stabilnosti ljusaka, proračunsko opterećenje konstrukcije podmornice i rezervu čvrstoće, principe racionalnog projektiranja sklopova konstrukcije kao što su oplata i orebrenje čvrstog trupa, čela podmornice, poprečne pregrade, toranj, te probleme čvrstoće detalja konstrukcije kao što su ojačanja uz prolaze i otvore na trupu.

- Čvrstoća i stabilnost sekcija podmornice provjeravali su se u tlačnoj posudi, sl. 3.
- U razdoblju intenzivne gradnje podmornica obavljena su i određena ispitivanja čvrstoće sklopova čvrstog trupa podmornice na modelima kakav je prikazan na sl. 4.



Slika 3. Tlačna posuda za ispitivanja sekcija podmornice



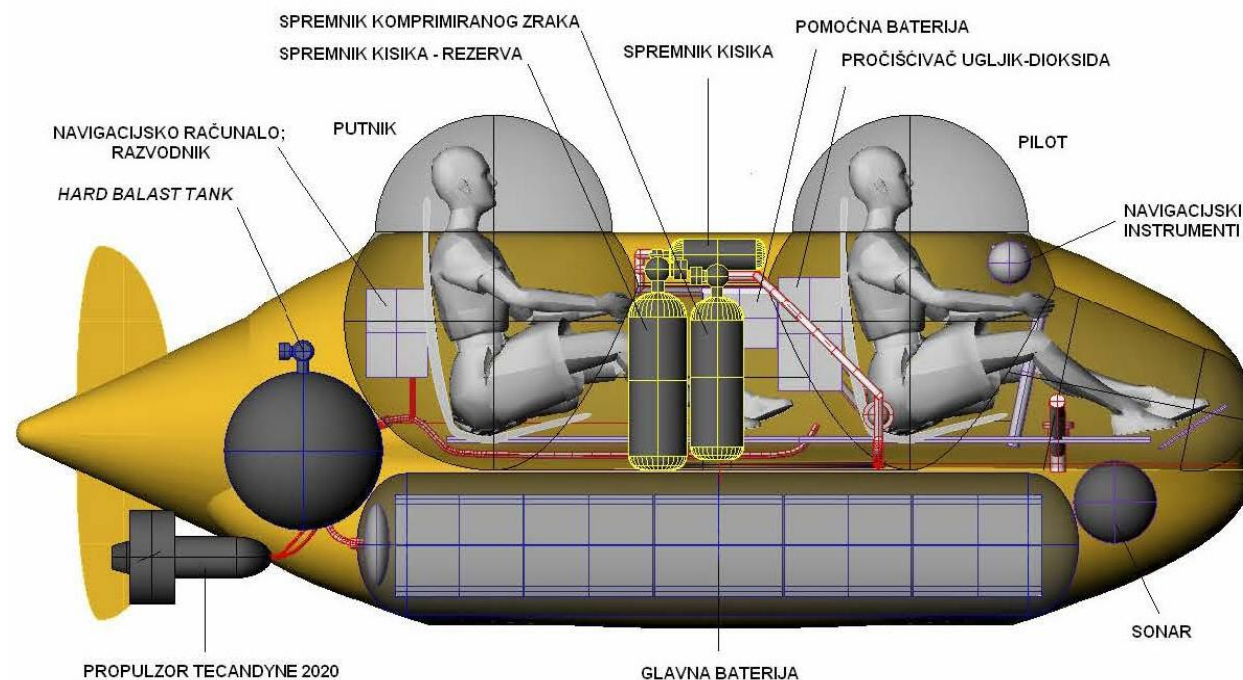
Slika 4. Čelični model čela podmornice za ispitivanje čvrstoće

- Godine 1965. ispitana je čvrstoća upravo izgrađenog trupa podmornice tlačenjem na ležaju.
- Izvršena su opsežna mjerenja deformacija pri stepenastom porastu i padu tlaka.
- Nakon toga, trup podmornice je porinut u more i podignut na plovnu dizalicu Veli Jože, koja je remorkerom otegljena u akvatorij otoka Mljeta.
- Tamo je trup podmornice spušten u more do dubine od 240 m i podvrgnut mjerenjima deformacija na većem broju poprečnih rebara.
- Mjerenje je provedeno kabelskom vezom između mjernih uređaja na trupu podmornice i onih na dizalici, s koje se ujedno upravljalo mjerenjem.
- Ovo je bilo prvo ispitivanje u naravi uranjanjem trupa u more i predstavljalo je velik i uzbudljiv pothvat.

- Nova postignuća na području analize čvrstoće i projektiranja čvrstog trupa podmornice obrađena su u dvijema doktorskim disertacijama (Senjanović 1970, Štulhofer 1980).
- Najznačajniji postignuća predstavljena su na međunarodnom skupu International Association for Shell Structures, održanom u Honolulu, Hawaii, SAD, 1971 (Štulhofer, Senjanović).
- Potaknut pozitivnim mišljenjem ruskih vojnih stručnjaka o novom pristupu rješavanju problema čvrstoće čvrstog trupa podmornice pomoću matričnih metoda na elektroničkom računalu i odjekom na radove prezentirane na prethodno spomenutom skupu, *Brodarski institut* objavio je 1972. godine knjigu *Theory of Shells of Revolution* (I. Senjanović), u kojoj su prikazana sva tadašnja hrvatska postignuća na tom području.
- Neki od objavljenih radova hrvatskih autora s područja konstrukcije podmornica referirani su u zborniku 7. Međunarodnog kongresa za brodske konstrukcije (ISSC).
- Radi se o najznačajnijoj međunarodnoj udruzi, koja preko svojih tehničkih komiteta obrađuje literaturu objavljenu u trogodišnjem međukongresnom razdoblju i uz kritičku ocjenu daje svojevrzne smjernice za daljnja istraživanja.

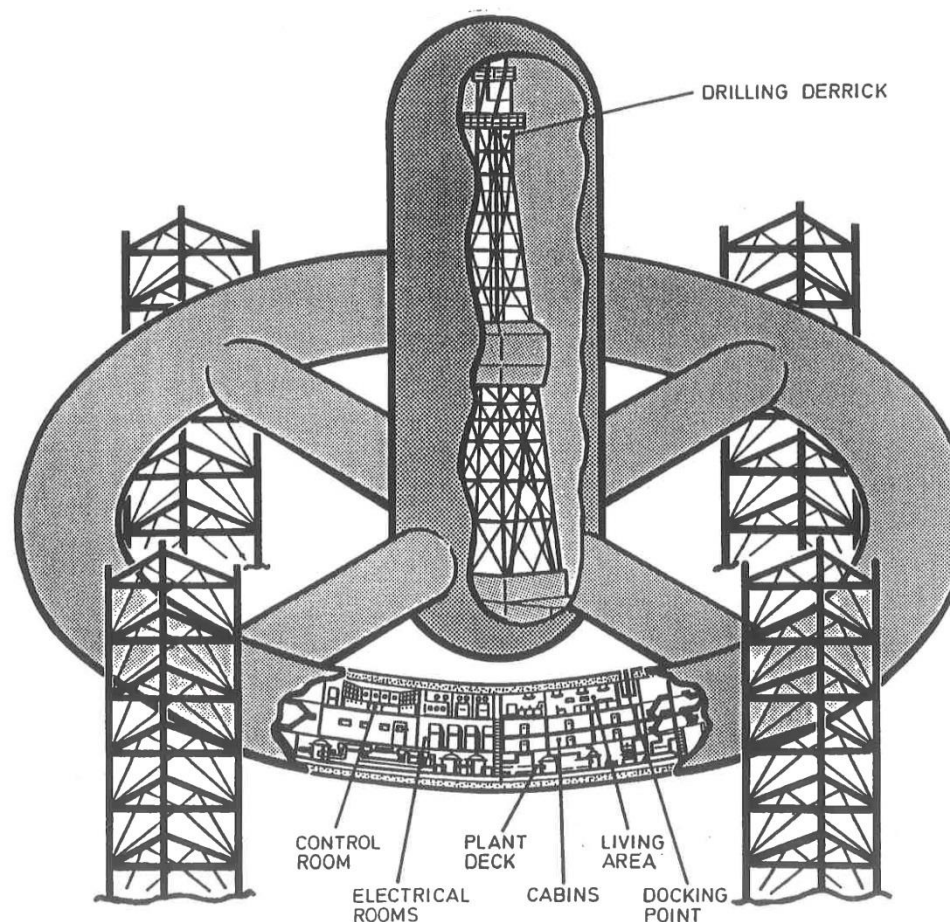
SUVREMENE PODVODNE KONSTRUKCIJE

- Osim ratnih podmornica, pretežno na nuklearni pogon zbog mogućnosti dugotrajne plovidbe u zaronjenom stanju i prolaska ispod leda u polarnom području, danas postoji potreba i za gradnjom industrijskih ronilica za istraživanje podmorja i inspekciju pomorskih objekata i podmorskih instalacija, kao i podmornica za turističke namjene, sl. 5.
- Pojavljuje se i ideja o gradnji trgovačkih podmornica za prijevoz kontejnera i nafte, čija je prednost također u mogućnosti plovidbe u polarnom području.



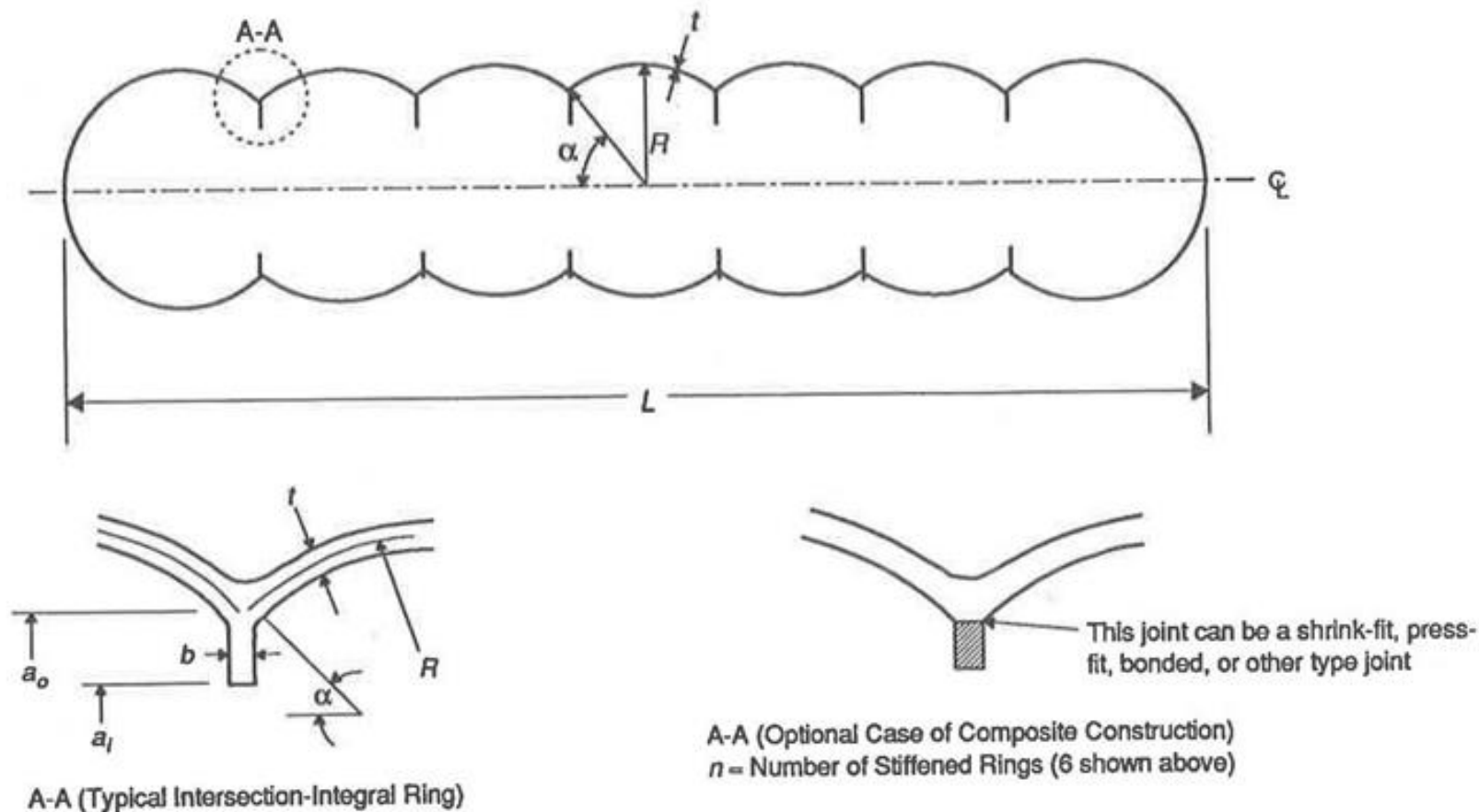
Slika 5. Autonomna rekreacijska ronilica

- U novije vrijeme posude pod tlakom koriste se u pomorskoj tehnici za podvodne instalacije s nastambama kao što je na primier podvodni bušaći toranj, sl. 6.



Slika 6. Podvodni bušaći toranj

- Jedno od suvremenih rješenja projektiranja čvrstog trupa podmornice je korištenje sfernih segmenata u svrhu smanjenja težine.

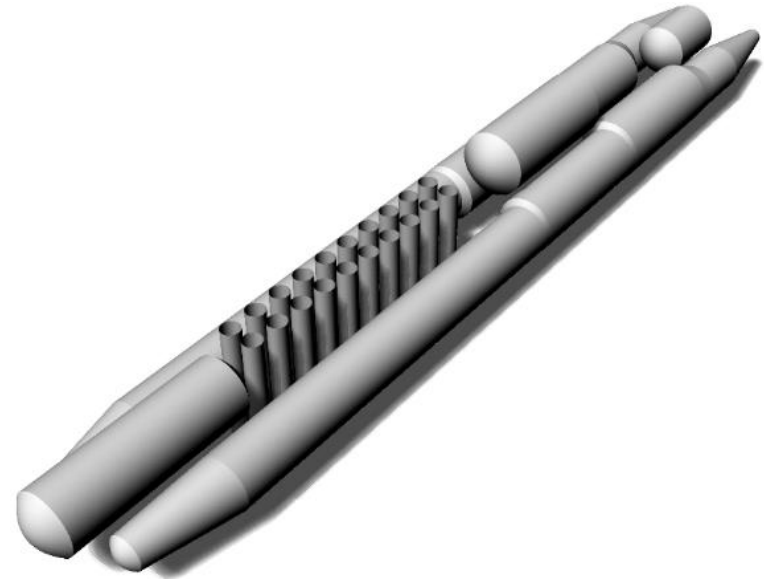


Slika 7. Čvrsti trup podmornice kao sklop sfernih segmenata

- Posebno je zanimljiva analiza čvrstoće i optimizacija podmornice klase Typhoon uslijed složenosti konstrukcije.
- U namjeri da se poveća kapacitet podmornice i zadovolje zahtjevni kriteriji čvrstoće, čvrsti trup se sastoji od 5 ljuskastih segmenata što predstavlja jedinstveno rješenje, sl. 8 i 9.
- Ovo je najveća podmornica na svijetu s radijusom plovidbe od 8300 km. Opremljena je s 20 R-39 raketa, od kojih svaka nosi 10 nuklearnih bojnih glava mase od 84 tone. Do sada je izgrađeno 6 podmornica klase Typhoon glavnih izmjera $L \times B \times H = 175 \times 23.3 \times 25$ m i istisnine 48000 tona.

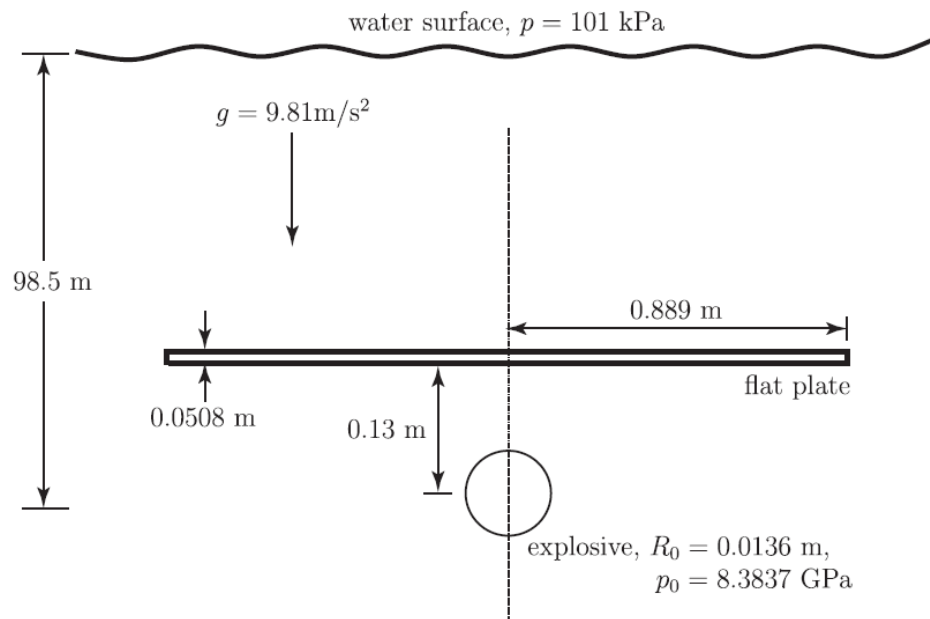


Slika 8. Izgled podmornice klase Typhoon

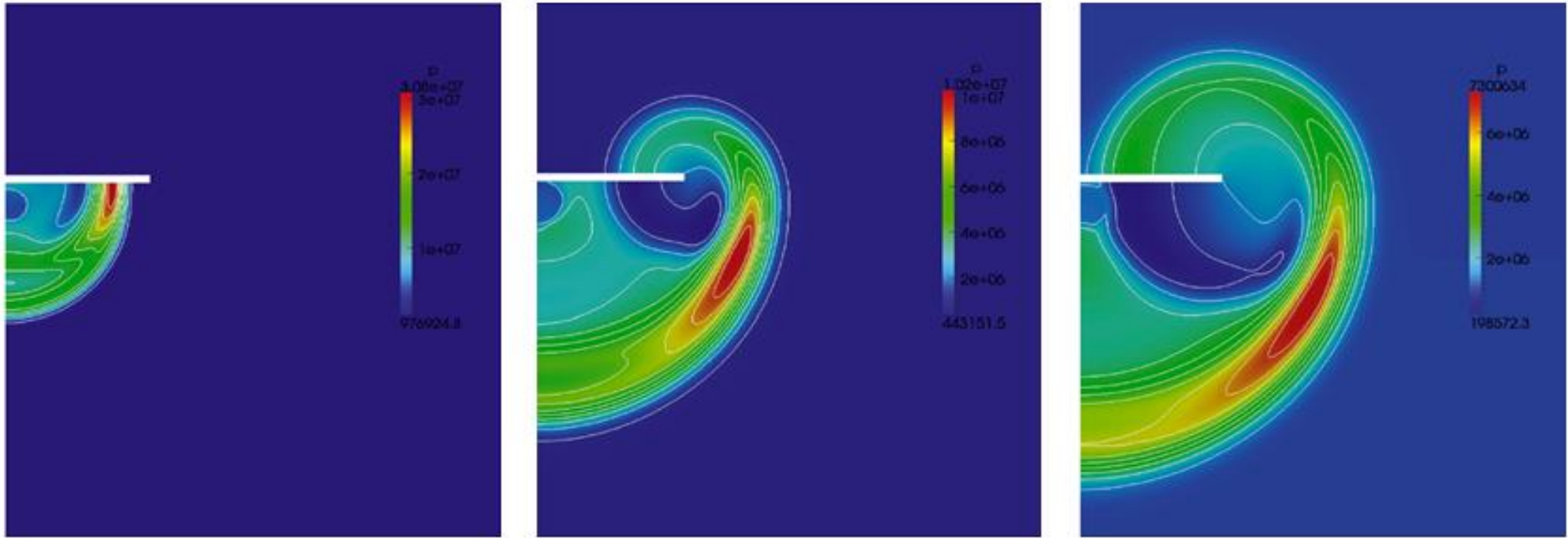


Slika 9. Segmenti čvrstog trupa podmornice klase Typhoon s cijevnim raketnim lanserima

- Problem podvodnih eksplozija još uvijek je vrlo aktualan za znanstvena istraživanja. Široka primjena računala u tehnici, s gotovo neograničenim mogućnostima, potakla je nagli razvoj novih računalno usmjerenih numeričkih metoda (*Computational Fluid Dynamics* (CFD)). U ovom području zapaženi su radovi prof. H. Jasaka i njegove istraživačke grupe na FSB-u i u tvrtci WIKKI u Londonu. Za ilustraciju navodi se primjer simulacije raspodjele i širenja tlaka u fluidu uslijed podvodne eksplozije ispod beskonačno duge krute ploče, sl. 10 i 11.



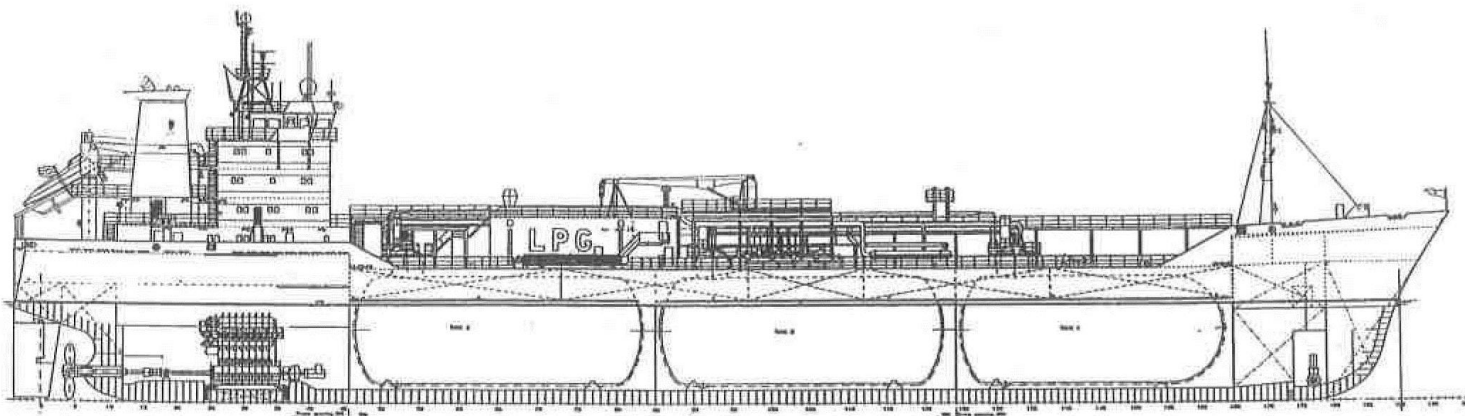
Slika 10. Osnovni podaci za analizu utjecaja podvodne eksplozije na ravnu ploču



Slika 11. Raspodjela i širenje tlaka fluida uslijed podvodne eksplozije ispod krute ploče $t=0.4, 0.8$ i 1.0 ms

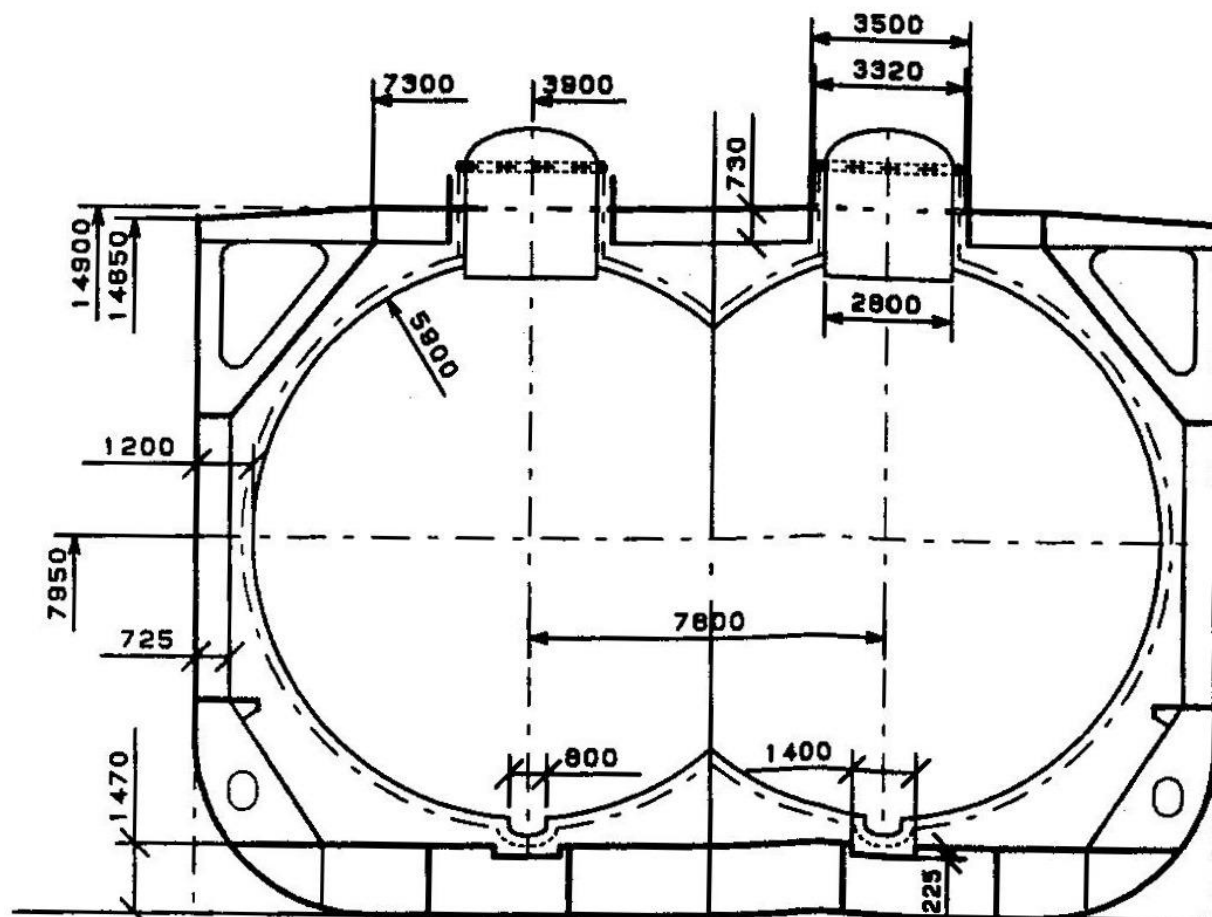
SPREMNICI NA BRODOVIMA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA

- Bogato iskustvo stečeno u osnivanju čvrstog trupa podmornica u razdoblju od 1960. do 1990. godine iskorišteno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u projektiranju spremnika na LPG brodovima (Liquefied Petroleum Gas Carriers), sl. 12.
- Za njemačku brodarsku tvrtku *Hartmann Reederei* projektirani su jednocilindrični i dvocilindrični spremnici tereta tipa C za nekoliko brodova. To su spremnici pod visokim tlakom do 4.5 bara i radnom temperaturom u rasponu od $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izrađuju se od čelika povišene čvrstoće. Sastoje se od orebrenog cilindričnog dijela i sferičnih odnosno torisferičnih čela.



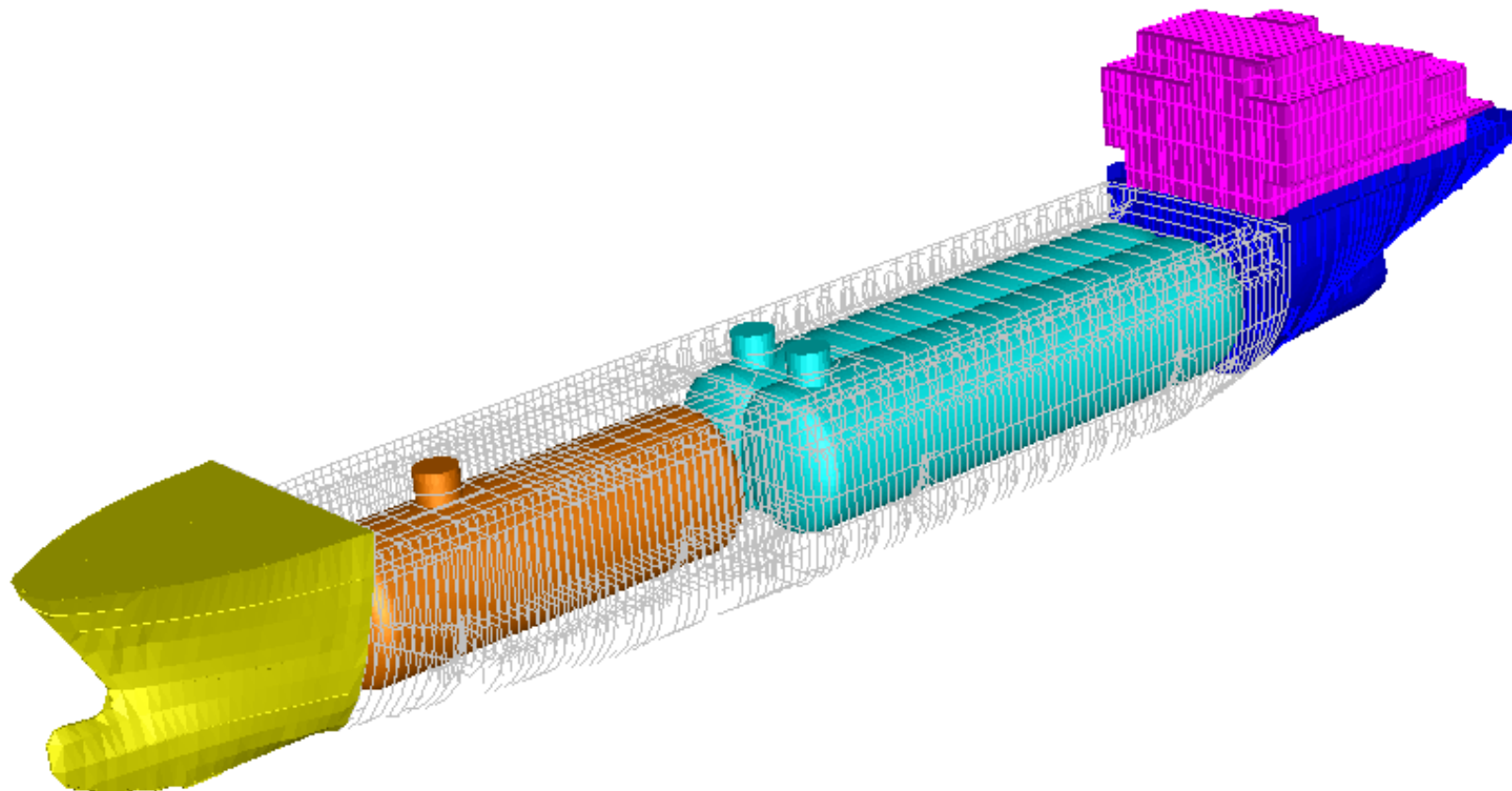
Slika 12. Brod za prijevoz ukapljenog plina, LPG od 8350 m^3
(Severnav Shipyard, Turnu-Severin, Romania)

- Spremnici su nestrukturni i oslanjaju se na dno broda preko dviju kolijevki obloženih specijalnim drvetom, sl. 13.



Slika 13. Smještaj dvocilindričnog spremnika

- Konstrukcija spremnika se provjerava i na izvijanje zbog mogućeg podtlaka pri istovaru tereta. Proračun se vrši metodom konačnih elemenata, sl. 14.



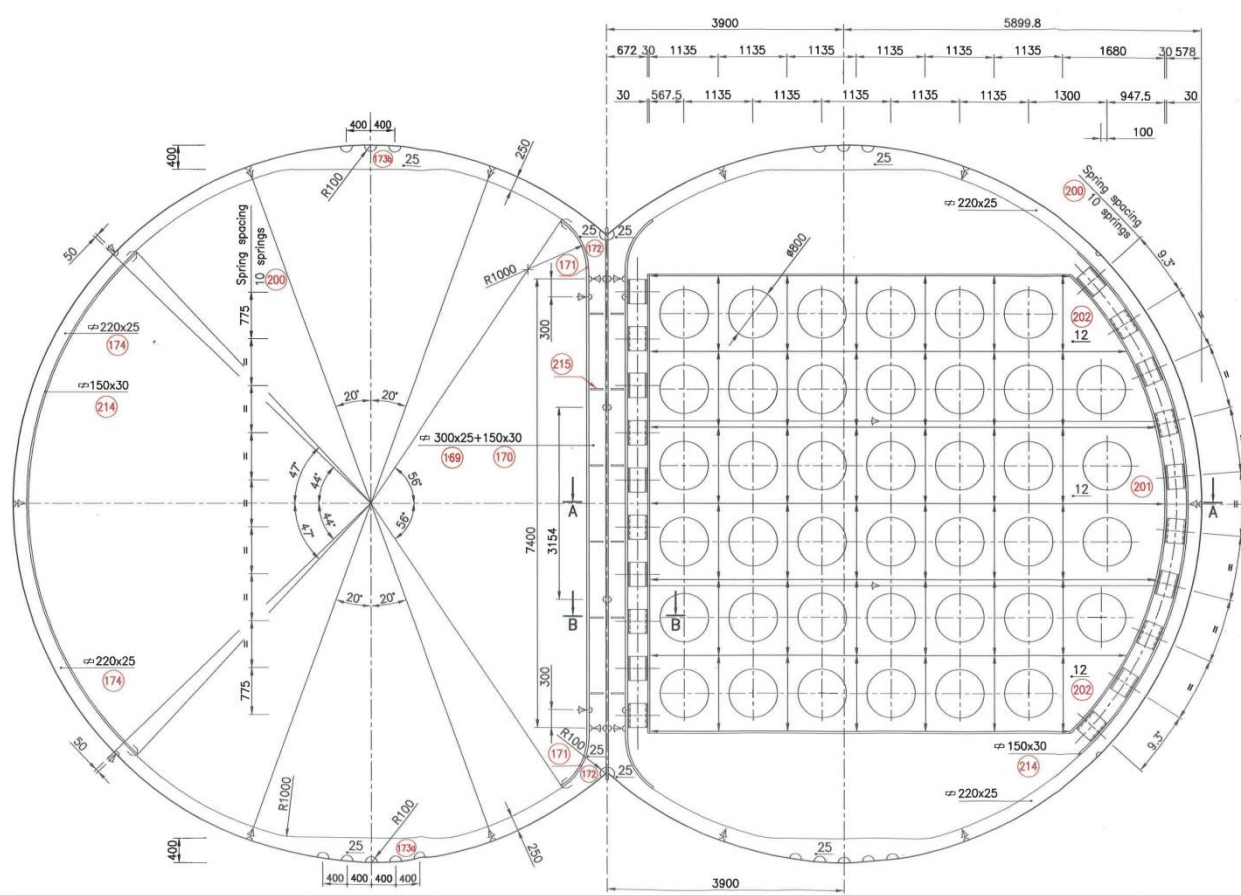
Slika 14. Globalni model konačnih elemenata brodske konstrukcije i spremnika

- Nakon izrade provjeravaju se geometrijska odstupanja i prema potrebi ugrađuju dodatna ojačanja, sl. 15. Nakon toga spremnici se ispituju pod povišenim tlakom.



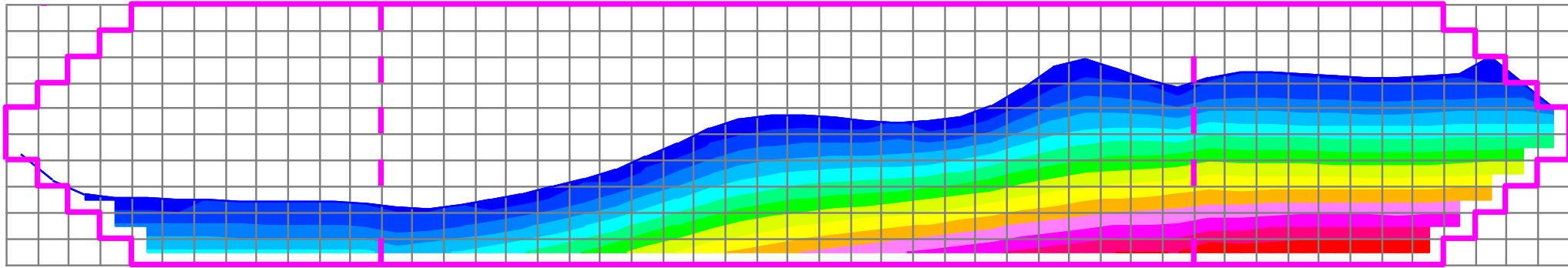
Slika 15. Izgrađeni dvocilindarski spremnik s lokalnim ukrućenjem
(Kvaerner Fecne, Nuclear Power Plants and Equipment Manufacturing Company, Bucharest, Romania)

- Da bi se smanjilo zapljuskivanje ukapljenog plina u spremniku, ugrađuju se pljuskače u obliku ukrepljenih perforiranih ploča kao što je prikazano na sl. 16.



Slika 16. Pljuskača u dvocilindričnom spremniku

- Danas se može, korištenjem suvremenih metoda hidrodinamike i odgovarajućih računalnih programa, simulirati zapljuskivanje tekućine u spremniku, sl. 17.



Slika 17. Simulacija zapljuskivanja tekućine u spremniku

- Palubni cilindrični spremnici za ukapljeni plin kapaciteta do 400 m³, i pod visokim tlakom od 18 bara kao i radnom temperaturom -50 °C, projektirani su za norvešku tvrtku *Hamworthy*. Ugrađeni su na brodovima izgrađenim u južnokorejskom brodogradilištu Hyundai Heavy Industries. Na sl. 18 prikazan je jedan takav spremnik postavljen na palubi LPG broda kapaciteta 82000 m³, sl 19.



Slika 18. Palubni spremnik od 400 m³



Slika 19. Brod za prijevoz ukapljenog plina, LPG od 82000 m³

ZAKLJUČAK

- Hrvatska ima vrlo dugu tradiciju gradnje podmornica, a izumima i unapređenjem projektiranja i tehnologije gradnje svojih znanstvenika i stručnjaka znatno je pridonijela razvoju podmorničarstva u svijetu.
- Podmornice mogu graditi samo zemlje s visoko osposobljenim kadrovskim potencijalom širokog spektra aktivnosti, te razvijenom brodograđevnom i pratećom industrijom.
- Zahvaljujući tim prerogativama Hrvatska se svrstala među rijetke zemlje, koje su ovladale ovom visokom tehnologijom.
- Gradnja podmornica za tako populacijski malu i ekonomski srednje razvijenu zemlju kao Hrvatska je usporediva s američkim svemirskim programom.

- Gradnja podmornica u Hrvatskoj je zamrla nakon njenog osamostaljenja i ulaskom u NATO savez.
- Međutim, bogato iskustvo stečeno u osnivanju čvrstog trupa podmornica koristi se danas u projektiranje spremnika za prijevoz ukapljenog plina s obzirom da se u oba slučaja radi o ljuskastim konstrukcijama.
- Osnivanje takovih sofisticiranih tankostijenih konstrukcija predstavlja posebni izazov u inženjerskoj praksi.
- Za sada se spremnici za ukapljeni plin projektiraju za strane naručitelje.
- Hrvatska brodogradnja u potrazi za nišama sofisticiranih brodova i pomorskih konstrukcija u svjetskoj brodogradnji trebala bi razmisliti o gradnji brodova za prijevoz ukapljenog plina.
- S obzirom na planirani LNG terminal na Krku, brodovi ovog tipa mogli bi se graditi i za vlastite potrebe.

Hvala na pozornosti!!!